

Deux semaines d'entraînement par intervalles de haute intensité en combinaison avec un appareil à ultrasons diffus non thermiques améliorent le profil lipidique et réduisent le pourcentage de graisse corporelle chez les femmes en surpoids

Publication dans Frontiers in Physiology (Traduit) - Christophe Hausswirth - Octobre 2019

Deux semaines d'entraînement par intervalles de haute intensité en combinaison avec un appareil à ultrasons diffus non thermiques améliorent le profil lipidique et réduisent le pourcentage de graisse corporelle chez les femmes en surpoids

Cette étude a évalué l'efficacité d'une stratégie innovante combinant les ultrasons à basse fréquence (LOFU) et l'entraînement par intervalles à haute intensité (HIIT) pour améliorer la condition physique et promouvoir la perte de graisse corporelle chez des femmes sédentaires en surpoids. Un plan expérimental randomisé en groupes parallèles, contrôlé par placebo, a été utilisé pour étudier l'efficacité d'un programme combiné LOFU et HIIT de 2 semaines (3 séances par semaine). Les participantes ont été réparties entre le groupe HIIT expérimental (HIITEXP, n = 10) et le groupe HIIT placebo (HIITPLA, n = 10). Les tests d'exercice de base (absorption maximale d'oxygène, force des membres inférieurs et test d'oxydation des substrats), l'évaluation de l'alimentation, les mesures anthropométriques et les prélèvements sanguins ont été réalisés au cours de la première semaine et répétés au cours de la quatrième semaine afin de déterminer les changements survenus après le programme (Post-HIIT). Pendant chaque séance d'entraînement, les groupes HIITEXP et HIITPLA ont porté une ceinture à ultrasons diffus non thermiques. Cependant, la ceinture n'a été mise en marche que pour le groupe HIITEXP. Les scores de changement delta ont été calculés pour le poids corporel, le pourcentage de graisse corporelle (Fat%), la masse musculaire, la V.O2max, les circonférences des hanches et de la taille, et toutes les variables lipidiques de la ligne de base à la post-HIIT. L'analyse statistique a été réalisée à l'aide d'une analyse factorielle à mesures répétées de la variance par groupe (HIITPLA et HIITEXP) et par période (base et post-HIIT). Les résultats ont montré des améliorations significatives de l'absorption maximale d'oxygène (HIITEXP ; Baseline 24.7 ± 5.4 mL kg-1 min-1, Post-HIIT 28.1 ± 5.5 mL kg-1 min-1 et HIITPLA; Baseline 28.4 ± 5.9 mL kg-1 min-1, Post-HIIT 31.4 ± 5.5 mL kg-1 min-1) pour les deux groupes. Des diminutions significatives du pourcentage de lipides (HIITEXP; base 32,7 ± 3,2 %, post-HIIT 28,9 \pm 3,5 % et HIITPLA; base 28,9 \pm 3,5 %, post-HIIT 28,9 \pm 3,4 % kg), du tour de taille (HIITEXP; base 95,8 ± 9. 6 cm, Post-HIIT 89.3 ± 8.9 cm et HIITPLA; Baseline 104.3 ± 3.5 cm, Post-HIIT 103.6 ± 3.4 cm) et les triglycérides (HIITEXP; -29.2%, HIITPLA; -6.7%) ont été observés dans le groupe HIITEXP uniquement. Ces résultats montrent que le HIIT combiné au LOFU est une intervention efficace pour améliorer la composition corporelle, le profil lipidique et la condition physique. Cette stratégie combinée a permis à des femmes sédentaires en surpoids d'obtenir des résultats positifs en matière de santé en seulement deux semaines.

Introduction

Le comportement sédentaire et l'inactivité physique sont étroitement associés au développement des facteurs de risque syndrome métabolique, notamment l'intolérance au glucose, la résistance à l'insuline, l'hypertension, la dyslipidémie et l'obésité (Eckel et al., 2010). La localisation de la graisse, en particulier du tissu adipeux abdominal, est également un facteur déterminant dans l'apparition des troubles métaboliques (Wajchenberg, 2000). En raison de la prévalence croissante du surpoids et de l'obésité, associée aux coûts de santé importants et au fardeau économique du comportement sédentaire, il est important d'étudier des stratégies qui induisent une perte de graisse corporelle et favorisent la gestion du poids à long terme (Ogden et al., 2006). Dans ce contexte, une alimentation équilibrée et des interventions en matière d'activité physique sont les principales approches utilisées pour réduire la graisse corporelle et améliorer le profil lipidique sanguin d'un individu (Donnelly 2 cardiaque maximale (HRmax)] entrecoupées d'un

et al., 2009; Johns et al., 2014). En effet, des comparaisons entre des groupes sédentaires et des groupes physiquement actifs dans des études transversales ont montré l'influence positive de l'exercice sur le profil lipidique sanguin (Durstine et al., 2001). L'entraînement continu d'intensité modérée (MICT) est actuellement recommandé pour favoriser la perte de poids (Donnelly et al., 2009), car il a été démontré que l'exercice prolongé augmente la mobilisation et l'oxydation des graisses (Katzmarzyk et al., 2001 ; Lazzer et al., 2017). Cependant, des données suggèrent que l'entraînement par intervalles de haute intensité (HIIT) est également une stratégie efficace pour réduire la graisse corporelle (Boutcher, 2011 ; Maillard et al., 2018) et pourrait conduire à une perte de masse grasse plus importante que le MICT (Wewege et al., 2017).

Les séances d'entraînement par intervalles à haute intensité impliquent de courtes périodes d'exercice à haute intensité [80-100 % de la fréquence

repos passif ou d'un exercice à faible intensité pour la récupération (Weston et al., 2014). Les programmes HIIT ont montré des avantages similaires à ceux du MICT en termes de condition physique, mais ils peuvent être réalisés en moins de temps et sont perçus comme plus agréables, ce qui peut favoriser l'adhésion à l'exercice (Bartlett et al., 2011). En outre, plusieurs études ont montré que les programmes HIIT ont un effet positif sur la perte de graisse (Tremblay et al., 1994 ; Mourier et al., 1997; Gibala et McGee, 2008; Tjonna et al., 2009 ; Boutcher, 2011) en raison d'adaptations métaboliques telles que l'augmentation l'oxydation des graisses (Talanian et al., 2007), l'augmentation du métabolisme oxydatif (Tremblay et al., 1994; Gibala et McGee, 2008) et l'amélioration de la sensibilité à l'insuline (Babraj et al., 2009). Par exemple, Tremblay et al. (1994) ont comparé l'effet d'un programme MICT et HIIT de 20 semaines (5 séances par semaine) sur la perte de graisse corporelle. Une réduction neuf fois plus importante de la graisse corporelle sous-cutanée a été observée après le programme HIIT par rapport au MICT, lorsque les séances d'exercice ont été corrigées en fonction du coût énergétique total. De plus, une expression significativement plus importante de l'enzyme 3-hydroxyacyl-coenyme A déshydrogénase, qui est impliquée dans la voie de la -oxydation, a été observée après le programme HIIT. Cela confirme la capacité du HIIT à améliorer l'oxydation des graisses dans une plus large mesure que le MICT. Des résultats similaires ont été rapportés par Trapp et al. (2008) en utilisant une durée d'entraînement plus courte (20 minutes par séance contre 40 minutes) où un entraînement de 15 semaines (3 séances par semaine) a conduit à une diminution significative de la masse grasse totale (-2,50 ± 0,83 kg) et à une réduction de la graisse abdominale centrale (-0,15 ± 0,07 kg) par rapport au MICT et aux groupes de contrôle sédentaires. Collectivement, ces résultats démontrent l'efficacité du HIIT pour améliorer la condition physique et réduire la graisse corporelle. Cependant, il existe d'autres inventions non basées sur l'exercice qui peuvent également favoriser la perte de graisse et améliorer le profil lipidique sanguin.

La thérapie par ultrasons à basse intensité (jusqu'à 17,5 W/cm2) et à basse fréquence (20-200 kHz) est une technique de remodelage du corps sûre et non invasive qui permet de réduire la masse graisseuse (Hotta, 2010 ; Tonucci et al., 2014 ; Friedmann, 2015 ; Juhasz et al., 2018). Cette technologie utilise les ultrasons pour produire un stress mécanique qui perturbe la membrane cellulaire du tissu adipeux (Hotta, 2010). Plus précisément, des microcavités sont créées qui provoquent ensuite la destruction des cellules et la liquéfaction des graisses (Tonucci

et al., 2014). Ces cellules adipeuses mobilisées sont métabolisées dans le foie ou éliminées par des processus cataboliques. Bien que la LOFU soit un outil émergent qui nécessite d'autres études bien contrôlées, les premiers résultats sont prometteurs. Les études utilisant la LOFU ont rapporté une réduction significative de la circonférence abdominale (-2,1 cm) (Tonucci et al., 2014), une diminution de la masse grasse totale (-3,5 %) et une réduction du tissu adipeux souscutané (moyenne de -2,4 %) (Milanese et al., 2014) à travers une série de traitements.

L'objectif de la présente étude était d'évaluer une stratégie innovante de perte de poids associant le LOFU à un programme HIIT sur la condition physique, la composition corporelle et le profil lipidique chez des femmes sédentaires en surpoids. Nous avons émis l'hypothèse qu'en plus des bénéfices du HIIT sur le métabolisme des graisses et la forme physique, la mobilisation accrue des graisses induite par le LOFU conduirait à une augmentation de l'absorption des graisses par les muscles en exercice et à des réductions supplémentaires de la masse grasse et du poids corporel. On s'attendait également à ce que l'ajout de LOFU entraîne des changements comparables dans la composition corporelle et le profil lipidique à la suite d'un entraînement de courte durée (2 semaines) et d'un entraînement plus long (15 à 20 semaines).

Matériels et méthodes

Participants

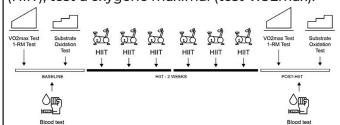
Vingt-trois femmes sédentaires et en bonne santé, âgées de 20 à 49 ans, ont été initialement recrutées. Les participantes se sont portées volontaires après avoir été pleinement informées de l'objectif de l'étude, des protocoles, des procédures et des risques potentiels liés à leur participation. Toutes les participantes ont donné leur consentement éclairé et l'étude a été approuvée par un comité d'éthique local (Université de Nice) conformément à la Déclaration d'Helsinki. Lors de la première visite au laboratoire, chaque sujet a subi un examen physique effectué par un cardiologue. Sur la base de cet examen, les participants présentant une hypertension artérielle, des extrasystoles ou des anomalies graves du rythme cardiaque ont été exclus de l'étude. Les participants ont ensuite été classés comme sédentaires avec un exercice aérobie modéré autodéclaré ≤ 15-min par semaine (Bartfay et Bartfay, 2014). Un dépistage médical supplémentaire a été effectué et les participants présentant des infections récentes, une incapacité musculaire et/ou articulaire, les fumeurs et ceux utilisant un traitement hormonal substitutif, une supplémentation en antioxydants ou prenant des médicaments affectant le métabolisme des lipides ou des lipoprotéines ont été exclus de l'étude. La phase du cycle menstruel a également été indiquée et les participantes ont commencé le test d'exercice de base pendant la phase folliculaire. Les participantes ont ensuite été réparties de manière aléatoire dans l'un des deux groupes. Pour des raisons de santé, trois participantes se sont retirées de l'étude (expérimentale n = 2, placebo n = 1). Nous avons donc analysé 20 participants : 10 pour le groupe HIIT expérimental (HIITEXP) et 10 pour le groupe HIIT placebo (HIITPLA). Il n'y avait pas de différence significative dans la composition corporelle, les mesures anthropométriques ou de condition physique entre les groupes avant le début de l'étude.

Procédures

Un plan expérimental randomisé en groupes parallèles, contrôlé par placebo, a été utilisé pour étudier l'efficacité d'un programme combiné de HIIT et de LOFU. L'étude a été menée sur une période de 4 semaines. Les tests d'exercice de base (absorption maximale d'oxygène, force des membres inférieurs et test d'oxydation des substrats), l'évaluation de l'alimentation, la composition corporelle, les mesures anthropométriques et les prélèvements sanguins ont été effectués au cours de la première semaine et répétés au cours de la quatrième semaine afin de déterminer les changements survenus après le programme (Post-HIIT). Chaque groupe (HIITEXP et HIITPLA) a été invité à suivre le même programme HIIT au cours des semaines 2 et 3 (3 séances par semaine). Pendant chaque séance d'entraînement, les groupes HIITEXP et HIITPLA ont porté une ceinture à ultrasons diffus non thermiques (Slim Sonic L-1440, Lausanne, Suisse) utilisant la technologie SoniC Resonance®. Ce dispositif a été décrit dans une étude précédente (Hafiz et al., 2014). Le système fonctionnait à une fréquence allant de 30 à 42 kHz. L'intensité appliquée était fixée entre 5 et 8 W/cm2 de puissance de cavitation. L'appareil pesait 1,6 kg et était placé à la taille de chaque participant. Il a été allumé pour le groupe HIITEXP et éteint pour le groupe HIITPLA pendant 45 minutes au cours de l'exercice. Les participants ont été invités à maintenir leurs pratiques alimentaires habituelles tout au long de l'étude et n'ont pas été informés que l'apport énergétique était une variable qui serait évaluée. La figure 1 donne un aperçu du plan d'expérience.

Figure 1

Aperçu du protocole expérimental. Une répétition maximale de la presse à jambes (test 1-RM), entraînement par intervalles de haute intensité (HIIT), test d'oxygène maximal (test V.O2max).



Séances de test d'exercices

Évaluation de la force maximale des membres inférieurs

Les mesures ont été effectuées deux jours avant et deux jours après les six séances de HIIT. Les participants se sont familiarisés avec la procédure de test au cours d'un échauffement standardisé composé de jump squats (2 séries de 5 répétitions), de sauts en contre-mouvement (2 séries de 5 répétitions) et d'extensions isocinétiques bilatérales sous-maximales des membres inférieurs à 40 % de la charge maximale maximale (2 séries de 15 répétitions) sur une presse à jambes numérique (eGym, Munich, Allemagne). La force musculaire a été mesurée comme la force maximale (Fmax) pendant une extension isocinétique maximale volontaire des membres inférieurs sur une presse à jambes numérique pendant un seul mouvement concentrique. La vitesse a été réglée de manière à ce que l'amplitude du mouvement soit atteinte en 2 secondes. Un logiciel personnalisé a ensuite été utilisé pour traduire les valeurs de couple en kilogrammes et calculer la Fmax, quel que soit l'angle de l'articulation. On a veillé à ce que les protocoles de test soient identiques pour tous les participants, y compris les encouragements verbaux standardisés et le retour d'information visuel fourni par un affichage en temps réel de la force produite. Des essais successifs ont été effectués jusqu'à ce que la Fmax ne puisse plus être améliorée, ce qui représente généralement sept à neuf tentatives (Aagaard et al., 2000).

Test d'absorption maximale d'oxygène

Une semaine avant et 2 à 4 jours après la période d'entraînement, les participants ont effectué un test incrémental jusqu'à épuisement sur un vélo ergomètre stationnaire à freinage électromagnétique (Monark LC6 novo, Vansbro, Suède) afin de déterminer la consommation maximale d'oxygène (V.O2max) et la puissance aérobie maximale (PAM). Pour minimiser les effets

de l'alimentation sur la performance physique, les participants ont standardisé leur alimentation dans les 24 heures précédant chaque test d'absorption maximale d'oxygène. En outre, 2 heures avant chaque test d'absorption maximale d'oxygène, les participants ont consommé un repas contenant au moins 2 g/kg/masse corporelle d'hydrates de carbone. Ce repas était recommandé par un diététicien sur la base de l'analyse diététique du participant sur 3 jours. Après un échauffement de 6 minutes à 60 W, la charge de travail a été augmentée par paliers de 20 W toutes les 2 minutes jusqu'à l'épuisement. Pendant ce test, l'absorption d'oxygène (V.O2) et le débit expiratoire (V.E) ont été recueillis et le rapport d'échange respiratoire (RER) a été calculé à partir du rapport entre l'absorption d'oxygène et la production de dioxyde de carbone (V.CO2 V. O2-1) à l'aide d'un analyseur de gaz respiration par respiration (Cosmed Quark CPET, Rome, Italie). La fréquence cardiaque (FC) a été enregistrée à l'aide d'une ceinture thoracique (moniteur de FC sans fil Cosmed, Rome, Italie). Les critères utilisés pour déterminer la V.O2max étaient au nombre de trois : un plateau de V.O2 malgré une augmentation de la puissance de sortie, un RER supérieur à 1,1 et une FC supérieure à 90 % de la FC maximale prédite (Howley et al., 1995). La moyenne des gaz expirés et des valeurs de FC a été calculée toutes les 10 secondes. La V.O2max et la PAM ont été définies comme la moyenne des valeurs consécutives les plus élevées de la V.O2 et de la puissance de sortie enregistrées pendant une période de 1 minute.

Évaluation de l'oxydation des substrats

Après le test d'absorption maximale d'oxygène, les participants sont retournés au laboratoire au moins 24 à 48 heures plus tard, à la même heure, après un jeûne d'une nuit (12 heures), afin de déterminer l'oxydation des substrats. Avant cet essai, ils ont été invités à noter tous les aliments et boissons ingérés au cours des 24 heures précédentes dans un journal alimentaire et à confirmer qu'ils étaient bien en état de jeûne. Ce formulaire a été photocopié et renvoyé à chaque sujet, qui devait reproduire cet apport alimentaire avant l'évaluation post-HIIT de l'oxydation des substrats. Avant l'exercice, les données d'échange gazeux au repos ont été acquises pendant 4 minutes pour s'assurer que les participants ne souffraient pas d'hyperventilation. L'exercice consistait en 4 minutes de vélo (Monark LC6 novo, Vansbro, Suède) à 40 W suivies d'augmentations d'intensité de 20 W toutes les 3 minutes jusqu'à ce que le RER reste supérieur à 1,0 pendant au moins 60 secondes. Ce protocole est similaire à celui utilisé par Achten et al. (2002) mais adapté aux femmes sédentaires. La cadence a été maintenue entre 60 et 80 rpm. Les

données d'échange gazeux (Cosmed Quark CPET, Rome, Italie) et la FC (Cosmed wireless HR monitor, Rome, Italie) ont été obtenues en continu, et les 2 dernières minutes de données d'échange gazeux de chaque étape ont été moyennées pour calculer le V.O2 et le V.CO2 et pour déterminer le RER. Plus précisément, les taux d'oxydation des glucides (CHO) et des lipides (g min-1) du corps entier ont été calculés à partir des valeurs de V.O2 et de V.CO2 mesurées pendant le test cycliste sous-maximal en utilisant les valeurs RER non protéiques et selon les équations standard (Jeukendrup et Wallis, 2005) : Oxydation des CHO = 4,210 (V.CO2) - 2,962 (V.O2) et oxydation des graisses = 1,695 (V.O2) - 1,701 (V.CO2).

Évaluation des apports alimentaires

Afin de minimiser un éventuel biais nutritionnel, tous les participants ont été invités à conserver leurs habitudes alimentaires tout au long de l'étude, de 3 jours avant le test de référence de la semaine 1 jusqu'à la fin du post-test de la semaine 4. Aucune tentative n'a été faite pour modifier la composition nutritionnelle des régimes individuels ou leur apport énergétique total. Cependant, les participants travaillaient tous pour la même organisation et il leur a été demandé de prendre leur petit-déjeuner, leur déjeuner et leur goûter à la cafétéria chaque jour de l'intervention. Les participants ont été invités à noter leurs apports alimentaires pendant les trois jours précédant le test d'absorption maximale d'oxygène de référence, dont un jour de week-end, et pendant trois jours au cours de la deuxième semaine d'entraînement (HIITWK2). Ces relevés alimentaires de 3 jours ont été analysés pour l'apport énergétique total et la composition des glucides, des lipides et des protéines à l'aide d'un logiciel disponible dans le commerce (Nutrilog, Marans, France).

Composition corporelle et évaluations anthropométriques

composition corporelle (poids corporel, La masse maigre et pourcentage de graisse corporelle [Fat%]) a été évaluée après un jeûne de 12 heures à l'aide d'un appareil d'analyse de l'impédance bioélectrique (Tanita model MC780 MA; Tanita Europe B.V., Amsterdam, Pays-Bas) qui a été précédemment validé par rapport à l'absorptiométrie biénergétique à rayons X [masse grasse (kg) ICC: 0,88; Lin C: 0,89] (Verney et al., 2016), en conformité avec les directives du fabricant. L'évaluation anthropométrique comprenait la taille, le tour de hanches et le tour de taille. Les mesures de la circonférence ont été évaluées à la même hauteur et sous tension constante par le même testeur à l'aide d'un mètre ruban calibré et d'une technique standardisée (Bernritter et al.,

2011). Les participants portaient des shorts légers et se tenaient debout, les bras croisés et les mains repliées sous les aisselles. Ils devaient détendre leurs muscles abdominaux, expirer et maintenir leur expiration pendant toute la durée de la mesure. Les mesures ont été prises en double et la valeur moyenne a été enregistrée. Ces évaluations ont été effectuées au départ et après l'IHAB.

Analyses de sang

Des échantillons de sang ont été prélevés avant et après 2 semaines de HIIT, après une période de jeûne de 12 heures. Les participants ont été invités à éviter l'alcool et les activités physiques intenses 48 heures avant le prélèvement. Les échantillons ont été prélevés dans la région antécubitale dans des tubes anticoagulants et séparateurs de sérum (SST) de 4 ml contenant de l'acide éthylènediaminetétraacétique (EDTA). Les échantillons de plasma ont ensuite été immédiatement transférés dans des microtubes pré-réfrigérés et les SST ont été immédiatement placés dans de la glace et centrifugés à 3000 tours/ minute pendant 10 minutes. Tous les échantillons ont été conservés à -20°C en vue d'analyses ultérieures dans un laboratoire commercial dans les deux semaines suivant la fin du programme de formation. Les échantillons de base et post-HIIT ont été analysés au cours d'une seule session de laboratoire afin de réduire les variations interessais. Le glycérol a été analysé par des techniques fluorométriques (Randox Laboratories, County Antril, Royaume-Uni) (Foster et al., 1978), les triglycérides (TG) (Bucolo et David, 1973) et les acides gras non estérifiés (AGNE) ont été analysés par une technique colorimétrique enzymatique (kit AGNE, Biomnis, Paris, France) en combinant l'acétyl coenzyme A synthétase et l'acétyl coenzyme A oxydase. La concentration de glucose à jeun a été analysée à l'aide du test Atellica® CH Glucose Oxidase (Siemens Healthcare SA, Renens, Suisse) (Fossati et al., 1983).

Protocole d'entraînement par intervalles à haute intensité (HIIT)

Le HIIT a été réalisé sur des vélos ergomètres Monark (Monark LC6 novo, Vansbro, Suède), trois fois par semaine, pendant 2 semaines. Les participants ont effectué toutes les séances d'entraînement à la même heure de la journée. Deux séances de familiarisation ont été effectuées avant le test V.O2max de référence pour permettre aux participants de s'habituer à porter le dispositif LOFU tout en s'exerçant pendant 30 minutes à une faible intensité (RPE11-12) (Borg, 1982). L'intensité de l'entraînement était contrôlée par la FC maximale (FCmax) obtenue lors du test d'absorption

maximale d'oxygène. Le protocole HIIT a été adapté du programme d'entraînement précédemment décrit par Steckling et al. (2016). Toutes les séances commençaient par un échauffement de 10 minutes à 60 % de la FCmax, comprenaient un retour au calme à 60 % de la FCmax et la durée totale de la séance d'entraînement était de 45 minutes. Les séances 1 et 2 consistaient en huit intervalles de 2 minutes à 90 % de la FC maximale, avec une récupération active de 2 minutes à 60 % de la FC maximale entre chaque intervalle. Les séances 3 et 4 consistaient en six intervalles de 3 minutes à 90 % de la FC maximale avec une récupération active de 2 minutes à 60 % de la FC maximale entre chaque intervalle. Les séances 5 et 6 consistaient en cinq intervalles de 4 minutes à 90 % de la FC maximale avec une récupération active de 2 minutes à 60 % de la FC maximale entre chaque intervalle. Toutes les séances ont été supervisées par le personnel.

Satisfaction des participants

À la fin de la période de formation, un questionnaire auto-administré sur la satisfaction des clients a été rempli [Client Satisfaction Questionnaire (CSQ-8)] (Attkisson et Zwick, 1982). Le CSQ-8 peut être facilement noté et se compose de huit éléments conçus pour mesurer la satisfaction des clients à l'égard de différents services. Chaque élément du CSQ-8 peut être noté de 1 à 4, le score final étant calculé en additionnant les scores des différents éléments (satisfaction minimale = 8 et satisfaction maximale = 32).

Analyse statistique

Toutes les données ont été stockées dans une base de données électronique et analysées à l'aide d'un logiciel statistique spécialisé (SPSS v20.0, Chicago, IL, États-Unis). Les résultats sont exprimés en moyenne ± déviation standard (SD). Les scores de changement delta ont été calculés pour le poids corporel, le pourcentage de graisse, la masse musculaire, la V.O2max, les tours de hanche et de taille, et toutes les variables lipidiques entre la ligne de base et la période post-HIIT. La normalité de la distribution de chaque variable a été testée à l'aide du test de Shapiro-Wilk. L'analyse statistique a été réalisée à l'aide d'une analyse de variance factorielle à mesures répétées (ANOVA) par groupe (HIITPLA et HIITEXP) et par période (base et post-HIIT). Si des effets principaux significatifs ont été observés, un test de différence significative honnête de Tukey a été effectué en tant qu'analyse post hoc pour mieux discerner les différences. Lorsque les hypothèses de normalité ou d'homogénéité des variances n'étaient pas respectées, les données ont été transformées en logarithme avant l'analyse. Les moyennes ont ensuite été détransformées et ramenées à leurs unités d'origine. Les critères d'interprétation de l'ampleur de l'effet sont les suivants : > 0,2 faible, > 0,5 modéré, > 0,8 important et > 1,3 très important (Cohen, 1988; Rosenthal, 1996). Une analyse a priori de l'échantillon a révélé que 10 paires de sujets étaient le minimum requis dans un modèle de paires appariées pour pouvoir rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle cette différence de réponse est nulle avec une probabilité (puissance) de 0,8. La probabilité d'erreur de type I associée à ce test de l'hypothèse nulle est de 0,05 (G Power version 3.1.3, Universität Kiel, Allemagne). La signification statistique a été acceptée à P < 0,05. Une analyse de corrélation a été utilisée pour explorer les relations entre ces scores de changement.

Résultats

Séances de test d'exercices

Évaluation de la force maximale des membres inférieurs (Fmax)

Les deux groupes ont amélioré leur Fmax (HIITEXP: 16,0 %; HIITPLA: 14,4 %) sans différence significative entre les groupes (P = 0,77) (tableau 1).

Test d'absorption maximale d'oxygène

Les deux groupes ont montré des améliorations similaires de la V.O2max (HIITEXP : 13,6% ; HIITPLA : 10,4%, P < 0,01) et de leur PAM (HIITEXP : 10,3% ; HIITPLA : 10,0%, P < 0,01), à la suite du programme d'entraînement HIIT (Tableau 1). Cependant, aucune différence significative n'a été observée entre les groupes en ce qui concerne la V.O2max (P = 0,72), la PAM (P = 0,95) ou la HRmax (P = 0,30).

Évaluation de l'oxydation des substrats

Pour l'ensemble des participants, la variation du RER (figure 2) en réponse à l'entraînement n'a été examinée que jusqu'à 100 W dans le groupe HITPLA (n = 10) et dans le groupe HIITEXP (n = 9), car de nombreuses femmes n'ont pas atteint une puissance de sortie supérieure à 120 W lors du test d'absorption maximale d'oxygène de la ligne de base. Aucune différence significative n'a été observée entre les groupes. Cependant, le taux d'oxydation des graisses a eu tendance à augmenter dans le groupe HIITEXP après une combinaison de HIIT et de LOFU à 60 W (base : 0,45 ± 0,03 g min-1 à post-HIIT : 0,65 ± 0,4 g min-1) (Figure 3) et à 80 W (base : 0,31 ± 0,02 g min-1 à post-HIIT : 0,41 ± 0,4 g min-1) (Figure 4).

Évaluation des apports a limentaires

Les apports nutritionnels étaient similaires (P > 0,05) dans les deux groupes au début de l'étude (tableau 2). Les résultats n'ont révélé aucun effet du HIIT (P = 0,29) ni aucune différence entre les groupes (P = 0,37) en ce qui concerne l'apport calorique total. Cependant, une augmentation significative (16,6 %, P < 0,05) de l'apport en CHO a été observée dans le groupe HIITPLA, passant de $46,8 \pm 5,9$ % au départ à $54,6 \pm 4,4$ % lors du HIITWK2. En outre, une diminution significative (17,6 %, P < 0,05) de l'apport en lipides a été observée dans l'étude HIITEXP, de $36,3 \pm 6,4$ % à la base à $29,9 \pm 3,2$ % lors de l'étude HIITWK2. Aucune différence significative n'a été observée pour les protéines (P > 0,05), quel que soit le groupe ou la période.

Composition corporelle et évaluation anthropométrique

Les changements dans la composition corporelle et les mesures anthropométriques sont présentés dans le tableau 3. Une interaction significative (groupe × temps) a été observée pour le poids corporel (P < 0,01), avec une diminution significative de -1,8 % (P < 0,01) du poids corporel pour les femmes du groupe HIITEXP après le programme HIIT. Cette diminution du poids corporel a entraîné une diminution de l'IMC pour le groupe HIITEXP (-1,9 %; P < 0,01). Aucune variation significative du

Tableau 1

Valeurs moyennes ± SD pour les mesures de la condition physique au départ et après l'intervention d'entraînement (Post-HIIT) dans les groupes Placebo (HIITPLA) et Expérimental (HIITEXP).

Parameters		Baseline	Post-HIIT	Change from baseline to Post-HIIT (%)	Cohen's d
Maximal oxygen uptake (mL kg ⁻¹	HIIT _{PLA}	28.4 ± 5.9	$31.4 \pm 5.5^{\ddagger}$	10.4	0.51
min ⁻¹)	$HIIT_{EXP}$	24.7 ± 5.4	$28.1 \pm 5.5^{\ddagger}$	13.6	0.61
Maximal aerobic power (W)	$HIIT_{PLA}$	154.5 ± 30.5	$170.0 \pm 30.8^{\ddagger}$	10.0	0.50
	$HIIT_{EXP}$	145.0 ± 45.4	$160.0 \pm 41.8^{\ddagger}$	10.3	0.34
Maximal heart rate (bpm)	$HIIT_{PLA}$	185.4 ± 7.8	186.8 ± 8.2	0.7	0.17
	$HIIT_{EXP}$	186.9 ± 9.5	188.1 ± 9.3	0.6	0.12
Lower limb maximal force (kg)	$HIIT_{PLA}$	178.6 ± 37.0	$207.3 \pm 37.3^{\ddagger}$	16.0	0.77
	HIIT _{EXP}	179.9 ± 33.7	$205.9 \pm 37.3^{\ddagger}$	14.4	0.73

[‡]Different from Baseline (P < 0.01). Percentage change from Baseline to Post-HIIT. The criteria to interpret the magnitude of the effect size were as follows; >0.2 small, >0.5 moderate, >0.8 large, and >1.3 very large).

Figure 2Changement dans le RER (moyenne ± SD) avant (Baseline) et après (Post-HIIT) le programme d'entraînement dans les groupes Placebo (HIITPLA) et Expérimental (HIITEXP)..

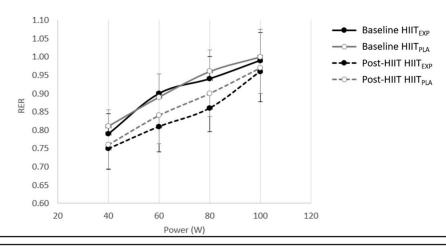


Figure 3Variation individuelle du RER (moyenne ± SD) avant (Baseline) et après (Post-HIIT) le programme d'entraînement à 60 W dans les groupes Placebo (HIITPLA) et Expérimental (HIITEXP)..

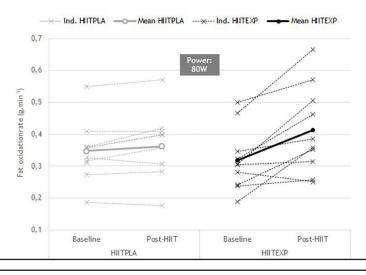


Figure 4Variation individuelle du RER (moyenne ± SD) avant (Baseline) et après (Post-HIIT) le programme d'entraînement à 60 W dans les groupes Placebo (HIITPLA) et Expérimental (HIITEXP)..

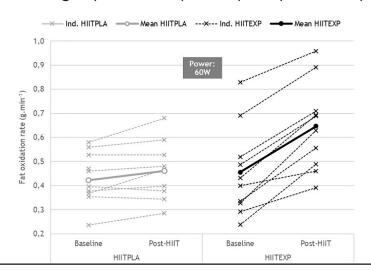


Tableau 2

Valeurs moyennes ± SD pour les changements dans l'apport alimentaire au départ et pendant la semaine 2 du programme d'entraînement HIIT (HIITWK2) dans les groupes Placebo (HIITPLA) et Expérimental (HIITEXP)...

,		Baseline	HIIT _{WK2}		
		Dascinic	TIIITWK2		
Nutrient intake (kcal)	HIIT _{PLA}	1589.4 ± 268.4	1655.5 ± 214.7		
	HIITEXP	1677.7 ± 246.8	1533.8 ± 212.5		
Carbohydrate (%)	HIIT _{PLA}	46.8 ± 5.9	$54.6 \pm 4.4^{\dagger}$		
	HIITEXP	49.5 ± 7.1	51.9 ± 2.7		
Fat (%)	HIIT _{PLA}	36.4 ± 8.7	32.7 ± 7.6		
	HIITEXP	36.3 ± 6.4	$29.9 \pm 3.2^{\dagger}$		
Protein (%)	HIIT _{PLA}	16.1 ± 4.6	12.7 ± 4.5		
	HIITEXP	14.1 ± 4.2	17.9 ± 3.7		
† Difference between Baseline and HIIT $_{WK2}$ (P < 0.05).					

poids corporel ou de l'IMC n'a été observée dans le groupe HIITPLA (P > 0,05). Des changements significatifs de la composition corporelle ont également été observés dans le groupe HIITEXP uniquement, avec une diminution de -4,5 % (P < 0,01) du pourcentage de masse grasse. En comparaison, aucun changement (0,2 %, P > 0,05) n'a été observé dans le groupe HIITPLA. Aucune différence n'a été observée dans les deux groupes pour la masse maigre (P > 0,05). Un effet d'interaction (groupe × temps, P < 0,01) a été observé pour la circonférence de la hanche avec une diminution significative pour le groupe HIITEXP (hanche : -4,1 %, P < 0,01 vs. -0,7 %, P > 0,05, pour HIITEXP et HIITPLA, respectivement). En outre, un effet d'interaction (groupe × temps, P < 0,01) a également été observé pour le tour de taille, avec une diminution significative pour le groupe HIITEXP uniquement (tour de taille : -6,7 %, P < 0,01 vs. -0,8 %, P > 0,05, pour HIITEXP et HIITPLA, respectivement).

Analyses de sang

Les modifications des variables biochimiques sont décrites dans le tableau 4. Un effet d'interaction significatif (groupe × temps) a été calculé pour les TG (P < 0,05), avec une réduction significative au fil du temps pour le groupe HIITEXP uniquement (-29,2 % vs. -6,7 % pour HIITEXP et HIITPLA, respectivement). Un effet d'interaction significatif (groupe × temps) a été calculé pour la NEFA (P < 0,05), avec une diminution post-HIIT pour le groupe HIITEXP (-33,9 % vs. -5,7 % pour HIITEXP et HIITPLA, respectivement). Un effet d'interaction significatif (groupe × temps) pour le glycérol a été enregistré (P < 0,05) avec une diminution de la concentration de glycérol pour le groupe HIITEXP (-31,1 % vs. -8,4 % pour HIITEXP et HIITPLA, respectivement). Une interaction significative a été enregistrée pour la glycémie à jeun (P < 0,05) avec une diminution au fil du temps pour le groupe HIITEXP uniquement (-5,9 % contre 0,6 % pour HIITEXP et HIITPLA,

respectivement).

Entraînement par intervalles à haute intensité (HIIT)

La durée totale de l'entraînement hebdomadaire était de ~135-min et l'adhésion à l'entraînement était supérieure à 95%. Le temps nécessaire pour atteindre la fréquence cardiaque cible variait de 20 à 90 s en fonction du nombre d'efforts précédents (Sessions 1 et 2 HIITEXP : 72 ± 28-s ; HIITPLA : 78 ± 37-s ; séances 3 et 4 HIITEXP : 47 ± 19-s ; HIITPLA : 43 ± 24-s ; séances 5 et 6 HIITEXP : 31 ± 17-s ; HIITPLA : 28 ± 19-s). Enfin, HIITEXP et HIITPLA ont passé respectivement environ 68,7 ± 10,1 % et 69,1 ± 7,9 % au-dessus de 90 % de la FCmax pendant toute la durée de l'entraînement.

Changement dans la satisfaction du sujet

Le CSQ-8 complété a été renvoyé par 18 femmes (9 dans chaque groupe, HIITEXP et HIITPLA), soit un taux de réponse de 90 %. La médiane du CSQ-8 après le programme HIIT était de 29,2 et 16,1 pour HIITPLA et HIITEXP, respectivement. Cela indique donc un niveau de satisfaction très élevé chez les femmes qui font de l'exercice en utilisant les ultrasons diffus, par rapport au groupe de femmes ayant reçu un placebo. 92 % des femmes du groupe HIITEXP referaient la procédure, contre seulement 57 % des femmes du groupe HIITPLA. De plus, la majorité (85 %) des femmes du groupe HIITEXP recommanderaient le programme à une amie, alors que ce n'était le cas que pour 50 % des femmes du groupe HIITPLA. En outre, nous avons observé une corrélation significative entre le niveau de satisfaction de la clientèle dans le groupe HIITEXP et la réduction des mesures de circonférence obtenues après le programme HIIT (r = -0.88; P < 0.05).

Discussion

La principale conclusion de cette étude est que le HIIT combiné au LOFU a entraîné une réduction significative du taux de graisse (-4,5 %). De plus, cette amélioration de la composition corporelle s'est accompagnée d'une diminution significative des TG, NEFA et glycérol plasmatiques dans le groupe HIITTEXP par rapport au groupe de contrôle placebo. Les deux groupes ont amélioré leur condition physique après le programme HIIT, comme le montrent les augmentations de la V.O2max, de la PAM et de la Fmax. Cependant, seul le groupe expérimental, qui s'est entraîné avec le LOFU activé, a connu des changements positifs au niveau de la composition corporelle, de la circonférence et du profil lipidique.

Tableau 3

Valeurs moyennes ± SD des variables de composition corporelle au départ et après l'intervention d'entraînement (Post-HIIT) dans les groupes Placebo (HIITPLA) et Expérimental (HIITEXP)..

Parameters		Baseline	Post-HIIT	Change from baseline to Post-HIIT (%)	Cohen's d
Body weight (kg)	HIIT _{PLA}	68.8 ± 9.2	68.5 ± 9.1	-0.5	0.03
300 3000	HIIT _{EXP}	71.0 ± 13.6	$69.8 \pm 13.6^{#\ddagger}$	-1.8	0.09
Lean mass (kg)	HIIT _{PLA}	48.8 ± 2.9	48.9 ± 3.5	0.2	0.03
	$HIIT_{EXP}$	47.8 ± 7.1	47.8 ± 6.6	0.0	0.00
Body fat (%)	HIIT _{PLA}	28.9 ± 3.5	28.9 ± 3.4	-0.2	0.01
	HIIT _{EXP}	32.7 ± 3.2	$31.2 \pm 3.0^{#\ddagger}$	-4.5	0.48
Hip circumference (cm)	$HIIT_PLA$	104.3 ± 3.5	103.6 ± 3.4	-0.7	0.21
	HIIT _{EXP}	109.2 ± 9.9	$104.7 \pm 9.4^{#\ddagger}$	-4.1	0.47
Waist circumference (cm)	HIIT _{PLA}	88.3 ± 7.3	87.6 ± 7.3	-0.8	0.10
	HIIT _{EXP}	95.8 ± 9.6	$89.3 \pm 8.9^{#\ddagger}$	-6.7	0.70
Body mass index (kg m^{-2})	HIIT _{PLA}	25.1 ± 2.9	25.1 ± 2.8	-0.0	0.00
	HIIT _{EXP}	26.5 ± 3.3	$26.0 \pm 3.3 \dagger$	-1.9	0.15

[#]Interaction effect (P < 0.01), †difference between Baseline and Post-HIIT (P < 0.05), †difference between Baseline and Post-HIIT (P < 0.01). Percentage change from Baseline to Post-HIIT. The criteria to interpret the magnitude of the effect size were as follows; >0.2 small, >0.5 moderate, >0.8 large, and >1.3 very large).

Tableau 4

Valeurs moyennes ± SD pour l'évaluation biochimique au départ et après l'intervention d'entraînement (Post-HIIT) dans les groupes Placebo (HIITPLA) et Expérimental (HIITEXP)..

Parameters		Baseline	Post-HIIT	Change from baseline to Post-HIIT (%)	Cohen's d
Triglycerides (mmol L ⁻¹)	HIIT _{PLA}	1.04 ± 0.27	0.97 ± 0.29	-6.7	0.25
	HIIT _{EXP}	1.13 ± 0.48	$0.80 \pm 0.22^{*\ddagger}$	-29.2	0.88
Non-esterified fatty acids (μ mol L ⁻¹)	$HIIT_{PLA}$	494 ± 78.1	467 ± 69.2	-5.7	0.16
	$HIIT_{EXP}$	565 ± 101.1	$374 \pm 87.3^{*\ddagger}$	-33.9	1.18
Glycerol (mmol L ⁻¹)	HIIT _{PLA}	0.045 ± 0.015	0.041 ± 0.014	-8.4	0.27
	$HIIT_{EXP}$	0.052 ± 0.023	$0.036 \pm 0.021^{*\ddagger}$	-31.1	0.73
Fasting glucose (g L ⁻¹)	$HIIT_{PLA}$	4.95 ± 0.48	4.92 ± 0.36	-0.6	0.07
	$HIIT_{EXP}$	5.11 ± 0.42	$4.81 \pm 0.39^{*\dagger}$	-5.9	0.74

^{*}Interaction effect (P < 0.05), †difference between Baseline and Post-HIIT (P < 0.05), †difference between Baseline and Post-HIIT (P < 0.01). Percentage change from Baseline to Post-HIIT. The criteria to interpret the magnitude of the effect size were as follows; >0.2 small, >0.5 moderate, >0.8 large, and >1.3 very large).

Il existe de plus en plus de preuves de l'efficacité du HIIT pour améliorer la condition physique (Batacan et al., 2017). Dans la présente étude, six séances de HIIT sur une période de deux semaines ont entraîné des augmentations significatives de la V.O2max pour les femmes qui n'avaient jamais été entraînées auparavant, tant dans le groupe HIITPLA que dans le groupe HIITEXP. Ce résultat confirme les effets bénéfiques de courtes séances de HIIT sur la condition aérobie (Boutcher, 2011) par rapport à l'entraînement traditionnel prolongé à l'état stable (Nybo et al., 2010). En effet, lorsque 36 hommes non entraînés ont suivi un programme de 12 semaines comprenant soit de la course à intervalles intenses (HIIT), soit de la musculation, soit de la course à intensité modérée prolongée (MICT), le groupe HIIT a enregistré une augmentation de 14 % de la V.O2max (Nybo et al., 2010). En revanche, le groupe MICT n'a enregistré qu'une amélioration de 7 % de la V.O2max, tandis que la V.O2max du groupe musculation est restée inchangée. Il convient également de noter que le HIIT a entraîné une augmentation plus importante de la condition physique alors que les participants

n'ont effectué qu'un tiers de la durée totale de l'entraînement par rapport aux groupes MICT et entraînement musculaire. Cette constatation confirme que l'intensité de l'entraînement est plus importante que le volume d'entraînement pour le développement de la condition physique cardiorespiratoire (Wenger et Bell, 1986). Plusieurs autres études ont rapporté une augmentation similaire de la V.O2max chez des participants non entraînés à celle observée dans la présente étude. Par exemple, Talanian et al. (2007) ont utilisé un protocole similaire de 2 semaines de HIIT et ont rapporté une augmentation de 13 % de la V.O2max chez des femmes n'ayant jamais été entraînées. Ces améliorations de la condition physique suggèrent qu'une combinaison d'intensités d'entraînement élevées (90 % HRmax), de courtes durées pour chaque séance (4 minutes) et de périodes de récupération intermittentes constitue un stimulus puissant pour l'adaptation physiologique.

Alors que les réductions de la masse grasse avec le HIIT ont déjà été associées à des améliorations de la voie d'oxydation des graisses (Astorino et al., 2017), dans la présente étude, il n'y avait qu'une tendance à la diminution du RER dans une gamme de charges de travail sous-maximales. Cette tendance était plus marquée dans le groupe HIITEXP que dans le groupe HIITPLA. Des études antérieures ont établi un lien entre l'amélioration de la capacité d'oxydation des acides gras à la suite d'un HIIT et la régulation à la hausse d'enzymes métaboliques clés dans la mitochondrie et le muscle squelettique (Talanian et al., 2007; Burgomaster et al., 2008; Perry et al., 2008; Boutcher, 2011). Cela inclut une expression significativement plus importante de l'enzyme 3-hydroxyacyl-coenyme A déshydrogénase (Tremblay et al., 1994), citrate synthase (Tremblay et al., 1994; Talanian et al..., 2007 ; Perry et al., 2008), la -hydroxyacyl-coenzyme A déshydrogénase musculaire (Talanian et al., 2007, 2010 ; Perry et al., 2008) et la protéine musculaire totale de liaison aux acides gras (Talanian et al., 2007, 2010). En utilisant un nombre comparable de séances de HIIT (Katzmarzyk et al., 2001), un volume d'entraînement (10 × 4 minutes) et une intensité (90 % HRmax) à ceux de la présente étude, Talanian et al. (2007) ont rapporté une amélioration significative de l'oxydation des graisses. Cependant, dans cette étude, et dans d'autres qui ont trouvé des changements positifs dans le RER, l'oxydation des substrats pendant l'exercice a été déterminée à l'aide d'un protocole différent (Burgomaster et al., 2008 ; Perry et al., 2008 ; Talanian et al., 2010). Plutôt que de mesurer la RER pendant un exercice graduel, on a utilisé un exercice prolongé de faible intensité à l'état d'équilibre. Il s'agit là d'une limite de la présente étude, car il est possible que des changements aient été observés si le RER des participants avait été évalué sur une durée d'exercice plus longue. Inversement, ce résultat peut également s'expliquer par le fait que le temps passé à 90 % de la FCmax est insuffisant pour induire l'oxydation des graisses dans l'ensemble du corps, par rapport à d'autres études à court terme (2 à 6 semaines) (Burgomaster et al., 2008; Perry et al., 2008).

Comme les résultats de la présente étude pour le groupe HIITEXP, il a déjà été démontré que le HIIT induisait une perte de masse grasse. Par exemple, Tremblay et al. (1994) ont constaté une réduction de la masse grasse après 20 semaines de HIIT. Trapp et al. (2008) ont confirmé ces résultats en faisant état d'une réduction de 2,5 kg de la masse grasse après un programme HIIT de 15 semaines. Cependant, les mêmes changements positifs dans la masse grasse n'ont pas été observés dans le groupe HIITPLA. Malgré le même programme HIIT, la masse grasse (-1,5 %) et le poids corporel sont restés inchangés. En outre, tous les programmes HIIT n'ont pas induit de changements dans la masse corporelle. Une méta-analyse a identifié

que collectivement, le HIIT à court terme (<12 semaines) n'a montré aucun effet sur le poids corporel et la masse grasse dans les populations normales ou en surpoids (Batacan et al., 2017). Cela suggère que l'ajout du LOFU à un programme HIIT a contribué à l'accélération de la perte de graisse observée dans le groupe HIITEXP.

La nouveauté de la présente étude a été d'ajouter le LOFU à un programme HIIT. Les appareils à ultrasons sont apparus avec la demande croissante de méthodes non invasives et sûres pour réduire la graisse localisée (Milanese et al., 2014 ; Tonucci et al., 2014). Dans cette technique, un transducteur en forme de dôme émet des ondes ultrasonores pulsées de basse fréquence et de faible intensité qui sont dirigées vers un petit point focal de tissu adipeux indésirable. L'analyse histologique et les études cliniques ont montré que cette énergie ultrasonique focalisée est libérée spécifiquement dans le tissu adipeux sous-cutané ciblé sans endommager les vaisseaux sanguins, les nerfs, le tissu conjonctif ou les muscles (Brown et al., 2009). Ce puissant stimulus mécanique crée une cavitation (rupture des membranes des cellules adipeuses), ce qui entraîne une lipolyse dans le tissu adipeux sous-cutané et une réduction des dépôts de graisse (Milanese et al., 2014 ; Tonucci et al., 2014). Dans ce contexte, la réduction de la graisse abdominale (c'est-à-dire du tissu adipeux localisé) après la LOFU est principalement le résultat d'une perturbation mécanique des adipocytes sous-cutanés. La libération du tissu adipeux entraîne également une augmentation des triglycérides circulants dans le liquide interstitiel. Il a été suggéré qu'une fois que les triglycérides perturbés mécaniquement sont libérés dans la circulation, ils suivent les voies normales du métabolisme physiologique des graisses (Hotta, 2010). Par conséquent, le port d'un appareil à ultrasons pendant l'exercice physique permet à ces cellules graisseuses perturbées d'entrer plus facilement dans la voie d'oxydation des graisses et d'être métabolisées comme source de carburant. Ceci, combiné à l'amélioration de la capacité à oxyder les graisses grâce à une réponse hormonale accrue à la fois au niveau systémique (c'est-à-dire l'augmentation catécholèmines circulantes et de la sensibilité à l'insuline) (Boutcher, 2011) et au niveau local (c'est-à-dire l'augmentation de l'irisine dans les muscles squelettiques) (Archundia-Herrera et al., 2017) associée au HIIT, montre comment les deux modalités peuvent avoir un effet synergique sur la réduction du taux de graisse (Fat%). De plus, en ayant un niveau plus élevé d'acides gras libres circulants, cette oxydation des graisses augmentée peut également se poursuivre pendant la période de récupération post-exercice (Greer et al., 2015 ; Wingfield et al., 2015). Les résultats de la présente étude confirment l'efficacité de la combinaison de HIIT et de LOFU pour cibler les graisses localisées.

Des réductions significatives de la circonférence ont été observées pour le HIITEXP uniquement (taille : -6.5 ± 1.2 cm ; hanche : -4.6 ± 0.8 cm). Ces changements de circonférence sont plus importants que ceux précédemment rapportés en utilisant les ultrasons de manière isolée (Moreno-Moraga et al., 2007; Teitelbaum et al., 2007; Tonucci et al., 2014). Par exemple, Tonucci et al. (2014) ont observé des réductions significatives, mais plus faibles, de 1,5 cm du tour de taille, 2,1 cm de la circonférence abdominale et 1,9 cm de la circonférence ombilicale après cinq séances (60 jours) de thérapie par ultrasons chez 20 femmes sédentaires en bonne santé. Moreno-Moraga et al. (2007) ont observé une réduction légèrement plus importante de 3,95 ± 1,99 cm de la circonférence après trois séances (visites mensuelles) chez 30 patients en bonne santé. Il convient toutefois de noter que ces études ont utilisé un nombre de séances de LOFU inférieur à celui utilisé dans le cadre de la présente étude. En général, une réduction du tour de taille est associée à l'obésité abdominale et est corrélée à la graisse viscérale et sous-cutanée (Pou et al., 2009). Cette constatation est conforme aux résultats de l'étude actuelle, où une réduction du tour de taille et du pourcentage de graisse a été observée. D'autres études ont également montré des réductions similaires de la masse grasse avec le traitement LOFU (Milanese et al., 2014; Shek et al., 2016). Par exemple, Milanese et al. (2014) ont réalisé des examens DXA sur 28 femmes non obèses avant et après un programme d'échographie de 10 semaines (2 séances par semaine) et ont constaté que les participantes avaient perdu en moyenne -3,4 % de masse grasse, avec une réduction de -3,9 % au niveau du tronc. Des résultats comparables ont été observés avec le HIIT seul, avec une réduction significative de la masse grasse abdominale totale et viscérale (Maillard et al., 2018). Néanmoins, compte tenu des améliorations notables de la composition corporelle observées dans la présente enquête, il semble qu'il y ait un effet synergique du HIIT et du LOFU.

Un facteur limitant de l'oxydation des graisses est la libération des triglycérides du tissu adipeux (Purdom et al., 2018). Avec le stress mécanique induit par la ceinture LOFU, cette libération est stimulée artificiellement et n'est plus régulée par des facteurs hormonaux ou enzymatiques. Il a également été démontré que le HIIT favorise l'augmentation des niveaux d'acides gras libres circulants pendant et après l'exercice (Wingfield et al., 2015). On pense que ces augmentations

peuvent favoriser l'oxydation des graisses pendant l'exercice et la période de récupération postexercice, entraînant une perte de graisse corporelle et une amélioration du profil lipidique (Greer et al., 2015). En effet, dans la présente étude, on a constaté une tendance à l'augmentation de l'oxydation des graisses et des réductions significatives des concentrations de TG, NEFA et glycérol dans le groupe HIITEXP. Bien que certaines études aient fait état d'une diminution des TG (Elmer et al., 2016) et des AGNE (Salvadori et al., 2014), ces résultats n'ont pas été systématiquement observés avec le HIIT (Batacan et al., 2017). Il existe également peu de données dans la littérature sur l'impact du LOFU sur les changements du profil sanguin lipidique, car la plupart des études se concentrent sur les mesures de la composition corporelle. Néanmoins, l'amélioration du profil lipidique constatée dans la présente étude après deux semaines d'exercice est comparable aux interventions HIIT précédentes d'une durée de 8 à 12 semaines (Wisloff et al., 2007). Cette amélioration similaire suggère que l'utilisation du LOFU pendant le HIIT peut favoriser des changements positifs plus importants dans les marqueurs sanguins lipidiques que l'exercice seul.

L'une des limites de cette étude est que, bien que le régime alimentaire ait été surveillé, il n'a pas été strictement contrôlé pendant toute la durée de l'intervention d'entraînement. L'apport calorique total et l'apport en macronutriments peuvent influencer l'utilisation du carburant pendant l'exercice (Fletcher et al., 2017). En outre, la faim et les réponses hormonales n'ont pas été enregistrées pendant toute la période d'entraînement. Cependant, en raison de l'apport énergétique total similaire rapporté dans les deux groupes, nous avons émis l'hypothèse qu'il n'y avait pas d'effet de l'entraînement ou de la LOFU sur l'appétit ou les perceptions de la faim. Cependant, une augmentation de l'apport en %CHO à la fin du programme HIIT a été observée pour le groupe de contrôle, sans changement dans la graisse corporelle, le poids corporel ou l'apport calorique total. Dans ce contexte, une évaluation des comportements alimentaires aurait pu apporter un éclairage supplémentaire sur l'absence de perte de poids. En effet, de nombreux aspects des comportements alimentaires sont associés au contrôle du poids à long terme et aux changements dans les zones du cerveau impliquées dans le contrôle de l'appétit (McFadden et al., 2013). Une compréhension plus approfondie de la faim et des réponses hormonales aurait également permis de mieux comprendre les raisons sous-jacentes à la diminution significative de l'apport en graisses (-6,4 %) chez les HIITEXP au cours de la deuxième semaine d'entraînement. Un autre facteur limitant a été l'absence d'un groupe

de contrôle sans exercice pour évaluer les effets de la LOFU de manière isolée. Il aurait également été intéressant d'effectuer des tests de suivi, 1 à 2 mois après l'intervention, pour déterminer si les changements dans la composition corporelle et le profil lipidique étaient stables. Une autre limite de l'étude a été l'utilisation de l'impédance bioélectrique (BIA) pour évaluer la composition corporelle plutôt que l'absorptiométrie à rayons X à double énergie (DXA). L'appareil BIA utilisé dans la présente étude s'est avéré très corrélé avec la DXA pour la mesure de la masse grasse et du taux de graisse (Verney et al., 2016 ; Thivel et al., 2018). Cependant, la concordance entre la BIA et la DXA est moins bonne pour la mesure de la masse musculaire et une fiabilité moindre a été observée avec un poids corporel initial élevé (Thivel et al., 2018). Étant donné que les variations de la masse grasse étaient le paramètre clé et que les groupes étaient étroitement appariés au début de la présente étude, la BIA a été considérée comme une alternative viable et rentable à l'utilisation de la DXA pour évaluer la composition corporelle. Néanmoins, l'ensemble des résultats de l'étude indique que la combinaison de HIIT et de LOFU peut avoir un impact positif sur la santé, la condition physique et la composition corporelle, et qu'il est justifié de poursuivre les recherches sur l'intervention en matière d'exercices.

Le niveau élevé de satisfaction des femmes s'exerçant avec la LOFU plaide en faveur d'une recherche future sur la mise en œuvre du HIIT et de la LOFU. Dans le groupe HIITEXP, 91,7 % des femmes suivraient à nouveau le programme, contre seulement 57,1 % dans le groupe HIITPLA. Ces niveaux de satisfaction sont plus élevés que ceux rapportés en utilisant LOFU seul (Tonucci et al., 2014). Cela peut s'expliquer par les changements observables dans la composition corporelle avec la combinaison de HIIT et de LOFU dans un laps de temps plus court. En effet, les études précédentes sur la LOFU ont fourni moins de traitements LOFU sur une période plus longue (Moreno-Moraga et al., 2007; Tonucci et al., 2014). En outre, la réduction des mesures de la circonférence était fortement corrélée à la satisfaction des participants (r = -0,88) dans le groupe HIITEXP. Ces résultats suggèrent que le niveau de satisfaction est élevé lorsque les participants ont connu des améliorations significatives de leur composition corporelle à la suite d'une intervention de courte durée.

En résumé, un programme HIIT de deux semaines et de six séances, combiné au LOFU, s'est avéré une stratégie efficace pour augmenter la condition physique et améliorer la composition corporelle chez des femmes sédentaires en surpoids. D'après les résultats de la présente étude, il semble que l'ajout du LOFU au HIIT puisse augmenter la mobilisation des acides gras libres du tissu adipeux, ce qui entraîne une plus grande perte de masse grasse. Cette approche combinée a également accéléré les effets positifs sur la santé, tels que l'amélioration du profil lipidique et la réduction du tour de taille et du tour de hanches dans le cadre d'une intervention à court terme. D'autres recherches sont nécessaires pour confirmer ces nouveaux résultats et optimiser l'utilisation de cette stratégie chez les hommes et les femmes.

Déclaration de disponibilité des données

Les ensembles de données générés pour cette étude sont disponibles sur demande auprès de l'auteur correspondant.

Déclaration d'éthique

Les études impliquant des participants humains ont été examinées et approuvées par l'Université de Nice. Les patients/participants ont donné leur consentement éclairé écrit pour participer à cette étude.

Contributions des auteurs

CH a conçu la recherche et la gestion du projet. L-AM et XN ont recueilli et analysé les données. KS a préparé et édité le manuscrit.

Conflit d'intérêts

XN est employé par la société BESCORED, qui n'a aucun lien avec d'autres sociétés.

Les autres auteurs déclarent que la recherche a été menée en l'absence de toute relation commerciale ou financière qui pourrait être interprétée comme un conflit d'intérêts potentiel.

Références

- Aagaard, P., Simonsen, E. B., Andersen, J. L., Magnusson, S. P., Halkjaer-Kristensen, J., and Dyhre-Poulsen, P. (2000). Neural inhibition during maximal eccentric and concentric quadriceps contraction: effects of resistance training. J. Appl. Physiol. 89, 2249–2257. doi: 10.1152/ jappl.2000.89.6.2249
- Achten, J., Gleeson, M., and Jeukendrup, A. E. (2002). Determination of the exercise intensity that elicits maximal fat oxidation. Med. Sci. Sports Exerc. 34, 92–97. doi: 10.1097/00005768-200201000-00015
- Archundia-Herrera, C., Macias-Cervantes, M., Ruiz-Munoz, B., Vargas-Ortiz, K., Kornhauser, C., and Perez-Vazquez, V. (2017). Muscle irisin response to aerobic vs HIIT in overweight female adolescents. Diabetol. Metab. Syndr. 9:101. doi: 10.1186/s13098-017-0302-5
- Astorino, T. A., Edmunds, R. M., Clark, A., King, L., Gallant, R. A., Namm, S., et al. (2017). High-intensity interval training

- increases cardiac output and V O2max. Med. Sci. Sports Exerc. 49, 265–273. doi: 10.1249/MSS.0000000000001099
- Attkisson, C. C., and Zwick, R. (1982). The client satisfaction questionnaire. Psychometric properties and correlations with service utilization and psychotherapy outcome. Eval. Program. Plann. 5, 233–237.
- Babraj, J. A., Vollaard, N. B., Keast, C., Guppy, F. M., Cottrell, G., and Timmons, J. A. (2009). Extremely short duration high intensity interval training substantially improves insulin action in young healthy males. BMC Endocr. Disord. 9:3. doi: 10.1186/1472-6823-9-3
- Bartfay, W., and Bartfay, E. (2014). A case-control study examining the effects of active versus sedentary lifestyles on measures of body iron burden and oxidative stress in postmenopausal women. Biol. Res. Nurs. 16, 38–45. doi: 10.1177/1099800413501717
- Bartlett, J. D., Close, G. L., MacLaren, D. P., Gregson, W., Drust, B., and Morton, J. P. (2011). High-intensity interval running is perceived to be more enjoyable than moderate-intensity continuous exercise: implications for exercise adherence. J. Sports Sci. 29, 547–553. doi: 10.1080/02640414.2010.545427
- Batacan, R. B. Jr., Duncan, M. J., Dalbo, V. J., Tucker, P. S., and Fenning, A. S. (2017). Effects of high-intensity interval training on cardiometabolic health: a systematic review and meta-analysis of intervention studies. Br. J. Sports Med. 51, 494–503. doi: 10.1136/bjsports-2015-095841
- Bernritter, J. A., Johnson, J. L., and Woodard, S. L. (2011).
 Validation of a novel method for measuring waist circumference. Plast. Surg. Nurs. 31, 9–13. doi: 10.1097/ PSN.0b013e3182066c87
- Borg, G. A. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. Med. Sci. Sports Exerc. 14, 377–381.
- Boutcher, S. H. (2011). High-intensity intermittent exercise and fat loss. J. Obes. 2011:868305. doi: 10.1155/2011/868305
- Brown, S. A., Greenbaum, L., Shtukmaster, S., Zadok, Y., Ben-Ezra, S., and Kushkuley, L. (2009). Characterization of nonthermal focused ultrasound for noninvasive selective fat cell disruption (lysis): technical and preclinical assessment. Plast. Reconstr. Surg. 124, 92–101. doi: 10.1097/ PRS.0b013e.31819c.59c7
- Bucolo, G., and David, H. (1973). Quantitative determination of serum triglycerides by the use of enzymes. Clin. Chem. 19, 476–482
- Burgomaster, K. A., Howarth, K. R., Phillips, S. M., Rakobowchuk, M., Macdonald, M. J., McGee, S. L., et al. (2008). Similar metabolic adaptations during exercise after low volume sprint interval and traditional endurance training in humans. J. Physiol. 586, 151–160. doi: 10.1113/ jphysiol.2007.142109
- Cohen, J. (1988). Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences, 2nd Edn. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Donnelly, J. E., Blair, S. N., Jakicic, J. M., Manore, M. M., Rankin, J. W., Smith, B. K., et al. (2009). American college of sports medicine position stand. Appropriate physical activity intervention strategies for weight loss and prevention of weight regain for adults. Med. Sci. Sports Exerc. 41, 459–471. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181949333
- Durstine, J. L., Grandjean, P. W., Davis, P. G., Ferguson, M. A., Alderson, N. L., and DuBose, K. D. (2001). Blood lipid and lipoprotein adaptations to exercise: a quantitative analysis. Sports Med. 31, 1033–1062. doi: 10.2165/00007256-200131150-00002
- Eckel, R. H., Alberti, K. G., Grundy, S. M., and Zimmet, P. Z. (2010). The metabolic syndrome. Lancet 375, 181–183. doi: 10.1016/S0140-6736(09)61794-3
- Elmer, D. J., Laird, R. H., Barberio, M. D., and Pascoe, D. D. (2016). Inflammatory, lipid, and body composition responses to interval training or moderate aerobic training. Eur. J. Appl. Physiol. 116, 601–609. doi: 10.1007/s00421-015-3308-4
- Fletcher, G., Eves, F. F., Glover, E. I., Robinson, S. L., Vernooij, C. A., Thompson, J. L., et al. (2017). Dietary intake is independently associated with the maximal capacity for

- fat oxidation during exercise. Am. J. Clin. Nutr. 105, 864–872. doi: 10.3945/ajcn.116.133520
- Fossati, P., Prencipe, L., and Berti, G. (1983). Enzymic creatinine assay: a new colorimetric method based on hydrogen peroxide measurement. Clin. Chem. 29, 1494– 1496
- Foster, K. J., Alberti, K. G., Hinks, L., Lloyd, B., Postle, A., Smythe, P., et al. (1978). Blood intermediary metabolite and insulin concentrations after an overnight fast: reference ranges for adults, and interrelations. Clin. Chem. 24, 1568–1572.
- Friedmann, D. P. (2015). A review of the aesthetic treatment of abdominal subcutaneous adipose tissue: background, implications, and therapeutic options. Dermatol. Surg. 41, 18–34. doi: 10.1097/DSS.000000000000209
- Gibala, M. J., and McGee, S. L. (2008). Metabolic adaptations to short-term high-intensity interval training: a little pain for a lot of gain? Exerc. Sport Sci. Rev. 36, 58–63. doi: 10.1097/ JES.0b013e318168ec1f
- Greer, B. K., Sirithienthad, P., Moffatt, R. J., Marcello, R. T., and Panton, L. B. (2015). EPOC Comparison between isocaloric bouts of steady-state aerobic, intermittent aerobic, and resistance training. Res. Q. Exerc. Sport. 86, 190–195. doi: 10.1080/02701367.2014.999190
- Hafiz, S., Durrer, D., and Schutz, Y. (2014). Impact des ultrasons diffus combinés au travail musculaire sur plaque vibrante sur la modification de la composition corporelle de femmes modérément obèses. Obésité 9, 286–292. doi: 10.1007/s11690-014-0432-y
- Hotta, T. A. (2010). Nonsurgical body contouring with focused ultrasound. Plast. Surg. Nurs. 30, 77–82. doi: 10.1097/PSN.0b013e3181dee9c9
- Howley, E. T., Bassett, D. R. Jr., and Welch, H. G. (1995).
 Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. Med. Sci. Sports Exerc. 27, 1292–1301.
- Jeukendrup, A. E., and Wallis, G. A. (2005). Measurement of substrate oxidation during exercise by means of gas exchange measurements. Int. J. Sports Med. 26(Suppl. 1), S28–S37. doi: 10.1055/s-2004-830512
- Johns, D. J., Hartmann-Boyce, J., Jebb, S. A., and Aveyard, P. (2014). Behavioural weight management review G. Diet or exercise interventions vs combined behavioral weight management programs: a systematic review and metaanalysis of direct comparisons. J. Acad Nutr. Diet. 114, 1557–1568. doi: 10.1016/j.jand.2014.07.005
- Juhasz, M., Korta, D., and Mesinkovska, N. A. (2018). A review of the use of ultrasound for skin tightening, body contouring, and cellulite reduction in dermatology. Dermatol. Surg. 44, 949–963. doi: 10.1097/ DSS.00000000000001551
- Katzmarzyk, P. T., Leon, A. S., Rankinen, T., Gagnon, J., Skinner, J. S., Wilmore, J. H., et al. (2001). Changes in blood lipids consequent to aerobic exercise training related to changes in body fatness and aerobic fitness. Metabolism 50, 841–848. doi: 10.1053/meta.2001.24190
- Lazzer, S., Tringali, G., Caccavale, M., De Micheli, R., Abbruzzese, L., and Sartorio, A. (2017). Effects of highintensity interval training on physical capacities and substrate oxidation rate in obese adolescents. J. Endocrinol. Invest. 40, 217–226. doi: 10.1007/s40618-016-0551-A
- Maillard, F., Pereira, B., and Boisseau, N. (2018). Effect of high-intensity interval training on total, abdominal and visceral fat mass: a meta-analysis. Sports Med. 48, 269–288. doi: 10.1007/s40279-017-0807-y
- McFadden, K. L., Cornier, M. A., Melanson, E. L., Bechtell, J. L., and Tregellas, J. R. (2013). Effects of exercise on resting-state default mode and salience network activity in overweight/obese adults. Neuroreport 24, 866–871. doi: 10.1097/WNR.0000000000000013
- Milanese, C., Cavedon, V., Piscitelli, F., and Zancanaro, C. (2014). Effect of low-intensity, low-frequency ultrasound treatment on anthropometry, subcutaneous adipose tissue, and body composition of young normal weight females. J. Cosmet. Dermatol. 13, 202–207. doi: 10.1111/

jocd.12101

- Moreno-Moraga, J., Valero-Altes, T., Riquelme, A. M., Isarria-Marcosy, M. I., and de la Torre, J. R. (2007). Body contouring by non-invasive transdermal focused ultrasound. Lasers. Surg. Med. 39, 315–323. doi: 10.1002/lsm.20478
- Mourier, A., Gautier, J. F., De Kerviler, E., Bigard, A. X., Villette, J. M., Garnier, J. P., et al. (1997). Mobilization of visceral adipose tissue related to the improvement in insulin sensitivity in response to physical training in NIDDM. Effects of branched-chain amino acid supplements. Diabetes Care 20, 385–391. doi: 10.2337/ diacare.20.3.385
- Nybo, L., Sundstrup, E., Jakobsen, M. D., Mohr, M., Hornstrup, T., Simonsen, L., et al. (2010). High-intensity training versus traditional exercise interventions for promoting health. Med. Sci. Sports Exerc. 42, 1951–1958. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181d99203
- Ogden, C. L., Carroll, M. D., Curtin, L. R., McDowell, M. A., Tabak, C. J., and Flegal, K. M. (2006). Prevalence of overweight and obesity in the United States, 1999-2004. JAMA 295, 1549–1555. doi: 10.1001/jama.295.13.1549
- Perry, C. G., Heigenhauser, G. J., Bonen, A., and Spriet, L. L. (2008). High-intensity aerobic interval training increases fat and carbohydrate metabolic capacities in human skeletal muscle. Appl. Physiol. Nutr. Metab. 33, 1112–1123. doi: 10.1139/H08-097
- Pou, K. M., Massaro, J. M., Hoffmann, U., Lieb, K., Vasan, R. S., O'Donnell, C. J., et al. (2009). Patterns of abdominal fat distribution: the framingham heart study. Diabetes Care 32, 481–485. doi: 10.2337/dc08-1359
- Purdom, T., Kravitz, L., Dokladny, K., and Mermier, C. (2018). Understanding the factors that effect maximal fat oxidation. J. Int. Soc. Sports Nutr. 15:3. doi: 10.1186/s12970-018-0207-1
- Rosenthal, J. A. (1996). Qualitative descriptors of strength of association and effect size. J. Soc. Sci. Res. 21, 37–59. doi: 10.1300/J079v21n04_02
- Salvadori, A., Fanari, P., Marzullo, P., Codecasa, F., Tovaglieri, I., Cornacchia, M., et al. (2014). Short bouts of anaerobic exercise increase non-esterified fatty acids release in obesity. Eur. J. Nutr. 53, 243–249. doi: 10.1007/s00394-013-0522-x
- Shek, S. Y., Yeung, C. K., Chan, J. C., and Chan, H. H. (2016).
 The efficacy of a combination non-thermal focused ultrasound and radiofrequency device for noninvasive body contouring in Asians. Lasers. Surg. Med. 48, 203–207. doi: 10.1002/lsm.22406
- Steckling, F. M., Farinha, J. B., Santos, D. L., Bresciani, G., Mortari, J. A., Stefanello, S. T., et al. (2016). High Intensity Interval Training Reduces the Levels of Serum Inflammatory Cytokine on Women with Metabolic Syndrome. Exp. Clin. Endocrinol. Diabetes 124, 597–601. doi: 10.1055/s-0042-111044
- Talanian, J. L., Galloway, S. D., Heigenhauser, G. J., Bonen, A., and Spriet, L. L. (2007). Two weeks of high-intensity aerobic interval training increases the capacity for fat oxidation during exercise in women. J. Appl. Physiol, 102, 1439–1447. doi: 10.1152/japplphysiol.01098.2006
- Talanian, J. L., Holloway, G. P., Snook, L. A., Heigenhauser, G. J., Bonen, A., and Spriet, L. L. (2010). Exercise training increases sarcolemmal and mitochondrial fatty acid transport proteins in human skeletal muscle. Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab. 299, E180–E188. doi: 10.1152/ ajpendo.00073.2010
- Teitelbaum, S. A., Burns, J. L., Kubota, J., Matsuda, H.,

- Otto, M. J., Shirakabe, Y., et al. (2007). Noninvasive body contouring by focused ultrasound: safety and efficacy of the Contour I device in a multicenter, controlled, clinical study. Plast. Reconstr. Surg. 120, 779–789. doi: 10.1097/01. prs.0000270840.98133.c8
- Thivel, D., Verney, J., Miguet, M., Masurier, J., Cardenoux, C., Lambert, C., et al. (2018). The accuracy of bioelectrical impedance to track body composition changes depends on the degree of obesity in adolescents with obesity. Nutr. Res. 54, 60–68. doi: 10.1016/j.nutres.2018.04.001
- Tjonna, A. E., Stolen, T. O., Bye, A., Volden, M., Slordahl, S. A., Odegard, R., et al. (2009). Aerobic interval training reduces cardiovascular risk factors more than a multitreatment approach in overweight adolescents. Clin. Sci. 116, 317–326. doi: 10.1042/CS20080249
- Tonucci, L. B., Mourao, D. M., Ribeiro, A. Q., and Bressan, J. (2014). Noninvasive body contouring: biological and aesthetic effects of low-frequency, low-intensity ultrasound device. Aesthetic Plast. Surg. 38, 959–967. doi: 10.1007/s00266-014-0391-6
- Trapp, E. G., Chisholm, D. J., Freund, J., and Boutcher, S. H. (2008). The effects of high-intensity intermittent exercise training on fat loss and fasting insulin levels of young women. Int. J. Obes. 32, 684–691. doi: 10.1038/sj.ijo.0803781
- Tremblay, A., Simoneau, J. A., and Bouchard, C. (1994).
 Impact of exercise intensity on body fatness and skeletal muscle metabolism. Metabolism 43, 814–818. doi: 10.1016/0026-0495(94)90259-3
- Verney, J., Metz, L., Chaplais, E., Cardenoux, C., Pereira, B., and Thivel, D. (2016). Bioelectrical impedance is an accurate method to assess body composition in obese but not severely obese adolescents. Nutr. Res. 36, 663–670. doi: 10.1016/j.nutres.2016.04.003
- Wajchenberg, B. L. (2000). Subcutaneous and visceral adipose tissue: their relation to the metabolic syndrome. Endocr. Rev. 21, 697–738. doi: 10.1210/edrv.21.6.0415
- Wenger, H. A., and Bell, G. J. (1986). The interactions of intensity, frequency and duration of exercise training in altering cardiorespiratory fitness. Sports Med. 3, 346–356. doi: 10.2165/00007256-198603050-00004
- Weston, M., Taylor, K. L., Batterham, A. M., and Hopkins, W. G. (2014). Effects of low-volume high-intensity interval training (HIT) on fitness in adults: a meta-analysis of controlled and non-controlled trials. Sports Med. 44, 1005–1017. doi: 10.1007/s40279-014-0180-z
- Wewege, M., van den Berg, R., Ward, R. E., and Keech, A. (2017). The effects of high-intensity interval training vs. moderate-intensity continuous training on body composition in overweight and obese adults: a systematic review and meta-analysis. Obes. Rev. 18, 635–646. doi: 10.1111/obr.12532
- Wingfield, H. L., Smith-Ryan, A. E., Melvin, M. N., Roelofs, E. J., Trexler, E. T., Hackney, A. C., et al. (2015). The acute effect of exercise modality and nutrition manipulations on post-exercise resting energy expenditure and respiratory exchange ratio in women: a randomized trial. Sports Med. Open. 1:11. doi: 10.1186/s40798-015-0010-3
- Wisloff, U., Stoylen, A., Loennechen, J. P., Bruvold, M., Rognmo, O., Haram, P. M., et al. (2007). Superior cardiovascular effect of aerobic interval training versus moderate continuous training in heart failure patients: a randomized study. Circulation 115, 3086–3094. doi: 10.1161/ CIRCULATIONAHA.106.675041