



HAL
open science

Adaptations énergétiques aux variations de poids et au statut hormonal ovarien chez les athlètes

Sarah Bagot

► **To cite this version:**

Sarah Bagot. Adaptations énergétiques aux variations de poids et au statut hormonal ovarien chez les athlètes. Education. Université Clermont Auvergne, 2024. Français. NNT : 2024UCFA0155 . tel-04942118

HAL Id: tel-04942118

<https://theses.hal.science/tel-04942118v1>

Submitted on 12 Feb 2025

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.

THÈSE DE SCIENCES

École Doctorale des Sciences de la vie, Santé, Agronomie, Environnement

En vue de l'obtention du grade de
Docteur de l'Université Clermont Auvergne

Discipline : Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives
Spécialité : Activité Physique Adaptée et Santé

ADAPTATIONS ÉNERGÉTIQUES AUX VARIATIONS DE POIDS ET AU STATUT HORMONAL OVARIEN CHEZ LES ATHLÈTES

Présentée et soutenue publiquement par

Sarah BAGOT

Le 12 décembre 2024

Devant le jury composé de :

Pr. Graham FINLAYSON
Pr. Louise DELDICQUE
Pr. Elsa HEYMAN
Pr. David THIVEL
Pr. Martine DUCLOS
Pr. Nathalie BOISSEAU
Dr. Carina ENEA
Dr. Laurie ISACCO
Dr. Emilie CHANSÉAUME BUSSIERE

Université de Leeds
Université Catholique de Louvain
Université de Lille
Université Clermont Auvergne
Université Clermont Auvergne
Université Clermont Auvergne
Université de Poitiers
Université Clermont Auvergne
Entreprise Nutrifizz

Président
Rapporteure
Rapporteure
Directeur
Membre du jury
Membre du jury
Membre du jury
Co-directrice
Co-encadrante



REMERCIEMENTS

Aux membres du Jury de thèse et du Comité de Suivi de thèse,

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude à l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail de thèse, malgré vos emplois du temps très chargés. Je remercie également le **Pr. Martine Duclos** et le **Pr. Anthony C. Hackney** d'avoir accepté de faire partie de mon comité de suivi de thèse. Ce fut un honneur de pouvoir vous présenter l'avancement de mon travail et de bénéficier de votre expertise, de vos connaissances et de vos précieux conseils, tant pour la conduite de ma thèse que pour la vie de chercheur.

À mes directeurs de thèse,

Pr. David Thivel et **Dr. Laurie Isacco**, je vous remercie de m'avoir accueillie à bras ouverts au laboratoire. Merci d'avoir réussi à construire ce projet de thèse, que l'on pourrait croire sur-mesure tant je m'y identifie. Je vous suis reconnaissante pour votre confiance, votre bienveillance, votre disponibilité et pour vos retours d'expérience. Merci de m'avoir soutenue lors de mes nombreuses remises en question et d'avoir encouragé mes « prises de risque ». J'ai beaucoup appris à vos côtés, cela m'a permis d'évoluer aussi bien professionnellement que personnellement. **David**, merci pour tes encouragements et de m'aider à prendre confiance en moi (même si ce n'est vraiment pas facile...). Tu as toujours su trouver du temps pour être disponible quand j'en avais besoin, malgré ton emploi du temps plus que chargé. J'admire sincèrement ta polyvalence, ton dynamisme et ta capacité à prendre du recul sur tout... Je garde bien en tête : il faut « faire simple » ! J'y arriverai ! **Laurie**, merci pour ta bonne humeur communicative, tes mots, messages et attentions qui m'ont aidé à relever la tête dans les moments plus difficiles que les autres. Ton expertise et tes conseils avisés tout au long de cette thèse m'ont été indispensables. Merci à vous deux de m'avoir poussée à donner le meilleur de moi-même. J'ai vraiment passé des années très enrichissantes en tous points de vue à vos côtés.

À l'équipe Nutrifizz,

Merci **Dr. Émilie Chanséaume** et **Dr. Céline Gryson** d'avoir accepté de collaborer conjointement avec le laboratoire pour ce projet de thèse. Je suis plus que ravie d'avoir pu associer la dimension de la recherche scientifique à des applications plus concrètes *via* la R&D, le conseil, la formation et la sensibilisation auprès d'entreprises agroalimentaires. Merci pour toutes ces missions

intéressantes que vous m'avez confiées. Cela a été un plaisir de travailler avec vous sur des projets aussi variés qu'enrichissants, tout en conservant cette thématique de la « nutrition sportive ». **Émilie C**, merci pour ton accompagnement, tes conseils, ta « positive attitude » et ton incroyable calme à toute épreuve. **Céline**, merci pour ta bienveillance, ton enthousiasme, ta spontanéité et tous nos échanges sur le déroulement de la thèse qui m'ont aidée à relativiser. **Émilie D**, merci de m'avoir guidée dans les différents dossiers à mon arrivée. Il y en avait beaucoup à retenir et ce n'était pas évident. **Noriane**, merci pour ton aide précieuse tout au long de ces 3 dernières années. Ton soutien dans les missions a été vraiment important pour moi, surtout ces derniers mois ! **Mélina** et **Capucine**, merci pour votre bonne humeur et votre super gestion de la communication. De manière générale, bien que la thèse ait parfois pris le dessus, vous avez toujours su m'accueillir. J'ai pris plaisir à partager votre amour pour les restos et les pauses musicales entre midi et deux, qui permettent de se déconnecter le temps d'un instant. J'ai vraiment apprécié faire partie de votre « équipe de fille ».

À l'équipe statistique,

Un grand merci à **Dr. Bruno Pereira**, **Céline Lambert** et **Inès Ramos** pour votre expertise statistique, et ces fameuses « soirées stats » bien sympathiques à la DRCl. Merci **Bruno** pour ta bonne humeur qui a rendu les statistiques (presque) agréables. Merci **Inès** pour ta réactivité à toute épreuve sur ces derniers mois.

Au laboratoire AME2P,

Merci à tous les enseignants-chercheurs du Laboratoire AME2P. **Gaël**, **Julien** et **Laurie**, je vous remercie de m'avoir donné l'opportunité de m'essayer à l'enseignement au cours de ces 3 années. **Gaël**, un merci particulier pour ton aide dans la gestion du calorimètre (et de ses galères). Merci à **Lore** et toi, pour vos petits mots de soutien. J'ai beaucoup apprécié les quelques sorties trail avec vous ! **Nathalie**, tes messages d'encouragement m'ont fait plaisir dans cette dernière ligne droite. Merci également d'avoir pris en charge la gestion des nombreux mails de réservations du DXA pour les différents projets. **Monique**, notre « dame à tout faire » du labo, merci pour ton accueil chaleureux et ta bienveillance dès mon arrivée au laboratoire. Merci pour ta gestion impeccable des tâches administratives, ton aide précieuse lors de petits problèmes techniques, les commandes de matériel, et bien plus encore. Profite pleinement de ta retraite plus que bien méritée !

À tous les doctorants avec qui j'ai pu partager toute ou partie de cette thèse, un grand merci ! **Alicia**, je n'oublierai jamais les quelques jours de manip passés à Paris, aux allures de colonies de vacances, ou encore les quelques week-ends à Tzanou. **Terry**, dès mon premier jour, j'ai eu la chance

de faire la découverte du MétaMax à tes côtés et avoir un avant-goût des futures galères de fonctionnement qui m'attendaient. Merci pour ton partage d'expérience aussi bien sur la thèse, que sur la vie associative ou ta nouvelle vie au Népal, qui m'a offert des parenthèses de voyage. **Audrey**, merci pour tes conseils sur l'organisation des manips. C'était un plaisir de discuter avec toi et de partager nos expériences de judokates (j'attends toujours que l'on se fasse un combat, haha !). **Léna**, ma partenaire de thèse, avec qui j'ai partagé ces 3 années et de belles anecdotes ! J'ai vraiment apprécié les moments passés avec toi que ce soit dans le cadre de la thèse comme en dehors. Merci pour ton aide et tes précieux conseils, surtout dans cette dernière ligne droite. Je tâcherai de refaire des breaks de sédentarité sportifs plus souvent (surtout dans les moments de rush) !

À tous les ex-masters et futurs docteurs : **Alexis, Annaëlle, Baptiste, Camille M, Julie et Trevis**. Merci à tous pour votre bonne humeur. Vous apportez une belle énergie au labo et c'est un plaisir de venir travailler en sachant que l'on va passer un bon moment. Mention spéciale au duo **Alexis et Duane** (pas question de vous séparer, même dans ces remerciements !), votre humour un peu (voire trop) décalé m'a fait bien rire (ne m'en voulez pas si j'ai souvent demandé le silence ces 3 derniers mois). Ne vous inquiétez pas, je continuerai à faire « la bagarre » après la thèse, puisque « c'est ça, ma profession ! » comme vous aimez me le rappeler.

Elora, nous nous connaissons depuis la prépa à Paris... presque 10 ans déjà ! Puis VetAgro Sup et AME2P... Nos chemins se suivent ! Merci pour tes retours d'expérience et tes conseils aussi bien professionnels que personnels depuis tout ce temps. Sans ça, je ne suis pas sûre que j'aurais mis les pieds à Clermont un jour. Merci pour ton aide, ton soutien, ta présence et ton écoute sur ces années de thèse. Merci pour ces petits après-midis jeux, gâteaux et randos qui m'ont permis de me changer les idées. Je te souhaite plein de bonheur et d'épanouissement dans ta nouvelle vie de maître de conférences !

Enfin, les « Totally Staps amochées », **Camille C et Mélina**... Évidemment, je ne pouvais pas vous oublier ! Quelle Dream Team ! Notre groupe porte bien son nom ! Merci infiniment pour votre présence quotidienne tout au long de cette sacrée aventure. Vous m'avez toujours soutenue, dans les bons moments comme dans les plus difficiles que la thèse a pu offrir. Nos discussions, aussi bien sérieuses qu'absurdes, vos blagues pleines de sous-entendus qui me font quand même bien rire (mon premier degré a finalement beaucoup de second degré), nos soirées bouffe et jeux... Tout cela m'a énormément aidé à me changer les idées et à prendre du recul. **Mélina**, tu es brillante ! Tu as le cœur sur la main et tu es capable de très grandes choses (si on retire certain de tes styles, goûts musicaux et blagues douteuses de la liste, haha). Je n'oublierai jamais cet incroyable périple en voiture pour rejoindre notre Boubouille nationale. **Camille**, aka Boubouille, garde ce sale caractère qui te va si bien,

ton rire légendaire, ta façon d'envoyer les choses balader, ta spontanéité à toute épreuve... Mais « vraaaaaaiiiment », ne change pas (enfin si, même si c'est trop te demander, arrête de te blesser... S'il te plaît...).

À celle sans qui je ne me serais pas lancée,

Erika, mes premiers pas dans la recherche ont été faits à tes côtés. Bien que les années de COVID n'aient pas facilité la découverte de toutes les facettes de la recherche clinique, elles m'ont donné l'envie de poursuivre dans cette voie. Merci de m'avoir encouragée et accompagnée dans les démarches pour entreprendre ce doctorat. Sans toi, jamais je ne me serais lancée dans cette aventure. Je te remercie également pour avoir pris de mes nouvelles pendant la thèse et pour ton soutien depuis le début.

À tous les volontaires des études,

Un grand merci à **chacun des volontaires** ayant participé aux études, à **Freddy** et **Remi** de l'ASM, ainsi qu'à **Joffrey** du Clermont Foot 63 pour votre confiance. Votre intérêt et votre implication dans ce projet ont été essentiels. Sans vous, la recherche ne pourrait pas avancer et ce fut un véritable plaisir de voir que les premiers concernés étaient motivés à s'y investir activement. J'ai eu la chance de rencontrer des athlètes passionnés par leur sport, avec qui j'ai pris plaisir à échanger, et avec qui j'ai parfois même gardé contact.

À tous mes amis et soutiens sportifs,

Je suis vraiment heureuse d'avoir réussi à concilier mon projet de thèse, et toute ma vie étudiante de manière générale, tout en maintenant ma pratique sportive, en particulier le judo. Le sport est essentiel à mon équilibre de vie et m'a permis de me « déconnecter » quotidiennement. Merci à tous mes **partenaires et amis judokas et jujitsukas** pour ces moments. Merci également d'avoir montré de l'intérêt pour ce sujet et d'avoir parfois même participé aux études. J'ai pris plaisir à échanger avec vous aussi bien aux entraînements qu'en compétition (ces fameuses discussions sur les régimes pour être au poids !).

Je tiens à remercier le **CUC Stade Clermontois** de m'avoir accueillie à mon arrivée à Clermont. Un merci tout particulier à **Sylvain** pour m'avoir encouragée à entreprendre cette thèse et pour m'avoir aidée à prendre confiance en moi. Merci à **Gaëtan** et **Maël**, qui dirigent également le pôle Espoir de Clermont, pour les quelques discussions que nous avons pu avoir et l'intérêt que vous avez porté à ce projet de thèse.

Merci à l'**ASM**, et plus particulièrement à **Freddy, Laurent** et **Kévin A** pour votre soutien dans mes projets, tant professionnels que sportifs. **Ricky**, notre Kung Fu Panda, qui a débarqué dans le « Sud » qu'est Clermont pour nous apporter sa bonne humeur et ses hurlements au bord du tatami, qui motivent comme personne. **Quentin**, merci pour ces moments d'introspections, de rire et bien sûr les petits tips jujitsu (je prends plaisir à faire du Ne Waza maintenant ! Incroyable !). Merci à **Tom** pour les séances de prépas physique et à **Kévin J** qui n'a pas hésité à prendre le relais de temps en temps (oui, j'étais au bord du malaise après les séances cardio, haha). **Michel**, pour les séances de préparation mentale qui, au-delà du judo, m'ont parfois aidée à prendre du recul sur la thèse (je tâcherai d'être plus assidue !).

Merci également à l'**US Etrepagny**, de toujours m'accueillir avec bonne humeur. Un grand merci à tous, et plus particulièrement à **Jean-Claude** et **Pascal**, pour vos mots et messages encourageants, et pour avoir pris régulièrement des nouvelles sur l'avancement de ma thèse.

À ma sœur de cœur et meilleure « sparring partner »,

Maëlle, tu sais déjà tout ! En six ans, tu es devenue une grande sœur pour moi. Merci pour ton incroyable soutien, tant sur le plan professionnel, que sportif et personnel. Tu es un véritable exemple. Tu m'as aidé à prendre confiance en moi (je pars de loin, il y a encore du chemin à parcourir, mais je vois que j'avance... Vraiment !). Ton implication et ton intérêt pour ce sujet de thèse ont été précieux. Merci de m'avoir écoutée et soutenue dans les bons moments comme dans mes multiples remises en question. Merci pour tous ces instants partagés au quotidien que ce soit sur le tatami, aux entraînements comme aux compétitions, ou en dehors. Je n'oublierai jamais ces week-ends improvisés et sportifs (la montée jusqu'au Puy de Dôme à vélo m'aura traumatisée à vie, mais je suis quand même fière de l'avoir faite, haha), ces stages aux quatre coins du monde, toutes tes petites attentions... Enfin, la liste est bien trop longue ! Merci pour tout, merci d'avoir été là, merci d'être toi ! Merci également à **Victor**, vous avez été des cobayes exemplaires ! Vous ferez le plus beau des mariages. Et une pensée pour votre adorable petit **Tiago**, qui égaye tous ceux qui l'entourent.

À ma meilleure amie de toujours,

Marine, nous nous connaissons depuis nos 3 ans, et bien que nous ayons été séparées géographiquement par nos études et que nous nous voyons peu, tu as toujours été présente quand j'en ai eu besoin. Merci pour ton soutien depuis ces 25 années. Nos virées parisiennes m'ont fait beaucoup de bien.

À ma famille,

Maman (**Laurence**), Papa (**Patrick**), **Emmanuelle** et **Charlotte**, merci d'avoir toujours cru en moi. **Maman** et **Papa**, merci de nous avoir laissées choisir notre voie et pour votre soutien sans faille depuis le début, même si vous ne « comprenez pas tout ». **Manu** et **Cha'**, merci d'avoir été des volontaires modèles pour mon étude. Malgré l'éloignement, nos appels quasi quotidiens en visio m'ont fait énormément de bien. Merci d'avoir supporté mes venues en « coup de vent », pour parfois moins de 24 heures, et mes veillées nocturnes pour travailler. Merci pour vos encouragements, ça me rend heureuse de vous rendre fiers de moi. Merci pour tous ces fous rires et tous ces moments partagés. Et bien sûr, une pensée à ma **Oria**, pour son réconfort et la dose quotidienne de ronron thérapie. À ma mamie **Thérèse**, merci pour nos appels récurrents qui m'ont apaisée. À ma grand-mère **Sonia**, partie rejoindre mon grand-père **Yvon**, j'espère que vous êtes fiers de moi de là-haut.

À tous,

J'ai reçu énormément de messages de la part de personnes, que je connaissais ou non, ayant pris connaissance d'une partie de ce projet de thèse grâce au concours « Ma Thèse en 180 secondes ». Merci à tous pour vos encouragements, vos félicitations, ainsi que pour vos questions et l'intérêt que vous avez manifesté sur le sujet de la femme et du sport. Cela m'a rendue fière et m'a fait énormément de bien. J'ai pris beaucoup de plaisir à participer à cette expérience, et tous les retours que j'ai pu avoir n'ont fait que renforcer mon envie de poursuivre dans la voie de la recherche en sciences du sport.

Enfin, je suis reconnaissante d'avoir été si bien entourée. Je dédie ce manuscrit à toutes les personnes ayant pris part, de près comme de loin, à ce beau projet.



« Ce n'est pas parce que les choses sont difficiles que nous n'osons pas, c'est parce que nous n'osons pas qu'elles sont difficiles. »

- Sénèque -

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	1
TABLE DES MATIÈRES	8
LISTE DES ABBRÉVIATIONS.....	12
LISTE DES TABLEAUX	13
LISTE DES FIGURES.....	14
CONTEXTUALISATION.....	15
REVUE DE LA LITTÉRATURE	17
CHAPITRE I Adaptations métaboliques et nutritionnelles à la perte de poids : quels facteurs déterminants d'une reprise de poids <i>a posteriori</i> ? Connaissances actuelles chez les individus normo-pondérés et questionnements chez les athlètes	18
I. Composition corporelle et perte de poids chez les athlètes.....	19
I.1 Les phénomènes de « <i>weight et fat overshoots</i> ».....	19
I.1.1 L'étude du Minnesota, une étude de référence.....	19
I.1.2 Les phénomènes de « <i>weight et fat overshoots</i> ».....	20
I.1.3 Le contrôle intrinsèque de la répartition énergétique entre masse non grasse et masse grasse : le « <i>lean-fat energy partitioning</i> »	22
I.2 Évolution du poids et de la composition corporelle en réponse à une restriction énergétique dans la population générale : revue systématique et méta-analyse.....	24
I.3 La pratique des variations de poids chez les athlètes : quels risques pour un « <i>fat overshoot</i> » ?	28
I.3.1 Le « <i>weight cycling</i> », une pratique courante sport-dépendante, non sans conséquences.....	28
I.3.2 Reprise de poids et modification de la composition corporelle en réponse à la perte de poids chez les athlètes habitués au « <i>weight cycling</i> » : revue systématique et méta-analyses.....	30
II. Adaptations nutritionnelles et modifications du profil alimentaire en réponse à la perte et reprise de poids chez les athlètes	38
II.1 Prévalence des troubles du comportement alimentaire chez l'athlète.....	38
II.2 Mécanismes de régulation de la prise alimentaire en réponse à une perte et reprise de poids	39
II.2.1 Régulation homéostatique de la prise alimentaire en réponse à la perte et reprise de poids	40
II.2.2 Régulation neurocognitive de la prise alimentaire en réponse à la perte et reprise de poids	46

III.	Adaptations métaboliques à la perte et reprise de poids chez les athlètes	52
III.1	Modifications du métabolisme de repos en réponse à la perte et reprise de poids ..	54
III.1.1	Perte de poids et mise en évidence d'un métabolisme « économe » chez les individus non-athlètes.....	54
III.1.2	Adaptations métaboliques à la perte de poids chez les athlètes	59
III.2	Modifications du métabolisme à l'exercice en réponse à une perte et reprise de poids	64
CHAPITRE II Statut hormonal ovarien et métabolisme énergétique de l'athlète féminine		69
I.	Le statut hormonal ovarien	70
I.1	Les étapes de la vie hormonale de la femme	70
I.2	Le cycle menstruel naturel et les variations hormonales ovariennes associées.....	71
I.2.1	Description du cycle menstruel naturel.....	71
I.2.2	Les symptômes menstruels et prémenstruels chez les athlètes féminines	75
I.2.3	Les troubles du cycle menstruel et leur prévalence chez les athlètes féminines...	75
I.3	La contraception hormonale chez les athlètes féminines.....	78
II.	L'influence du statut hormonal ovarien sur le poids et la composition corporelle chez les athlètes féminines.....	81
II.1	Cycle menstruel et variation de poids et de composition corporelle chez les athlètes féminines.....	82
II.2	Contraception hormonale et variations de poids et de composition corporelle chez les athlètes féminines.....	84
III.	L'influence du statut hormonal ovarien sur le métabolisme énergétique chez les athlètes féminines.....	87
III.1	L'effet du cycle menstruel sur le métabolisme énergétique de l'athlète féminine....	87
III.1.1	Cycle menstruel et métabolisme énergétique au repos.....	87
III.1.2	Cycle menstruel et métabolisme énergétique post-prandial	91
III.1.3	Cycle menstruel et métabolisme énergétique à l'exercice.....	92
III.2	L'effet de la contraception hormonale sur le métabolisme énergétique de l'athlète féminine	93
III.2.1	Contraception hormonale et métabolisme énergétique au repos.....	93
III.2.2	Contraception hormonale et métabolisme énergétique post-prandial	95
III.2.3	Contraception hormonale et métabolisme énergétique à l'exercice.....	96
OBJECTIFS DU PROJET DE THÈSE, ÉTUDES ET HYPOTHÈSES ASSOCIÉES		100
AXE I – ADAPTATIONS MÉTABOLIQUES ET NUTRITIONNELLES AUX VARIATIONS DE POIDS CHEZ DES ATHLÈTES HABITUÉS AU « WEIGHT CYCLING ». L'ÉTUDE WAVE.....		104
	Méthodologie générale de l'étude WAVE.....	105
I.	Participants.....	106

II.	Protocole expérimental de l'étude WAVE.....	106
III.	Travaux de thèse issus de l'étude WAVE.....	108
ÉTUDE 1	Associations entre le degré de perte de poids habituel et les apports nutritionnels en période de poids stable chez les athlètes habitués au « <i>weight cycling</i> ». Résultats préliminaires de l'étude WAVE	109
ÉTUDE 2	Adaptations métaboliques à un épisode de perte et reprise de poids chez des athlètes habitués au « <i>weight cycling</i> ». Résultats de l'étude WAVE	138
ÉTUDE 3	Adaptations nutritionnelles à un épisode de perte et reprise de poids chez des athlètes habitués au « <i>weight cycling</i> ». Résultats de l'étude WAVE	173
AXE II – CONSIDÉRATIONS MÉTHODOLOGIQUES SPÉCIFIQUES AUX TRAVAUX DE RECHERCHE CHEZ LA FEMME.....		203
Méthodologie générale.....		204
I.	Méthodologie générale de l'étude 1.....	205
II.	Méthodologie générale de l'étude 2.....	206
ÉTUDE 1	Un outil terrain de caractérisation du statut hormonal ovarien et des variations de poids chez les athlètes féminines : le questionnaire Answ'Her.....	207
ÉTUDE 2	Étude du métabolisme à l'exercice chez la femme : considérations pratiques et défis pour une recherche de qualité.....	231
AXE III – ADAPTATIONS ÉNERGÉTIQUES AU STATUT HORMONAL OVARIEN CHEZ LES ATHLÈTES FÉMININES EN PÉRIODE DE HAUTE CHARGE D'ENTRAÎNEMENT. L'ÉTUDE CAT WOMEN.....		253
Méthodologie générale de l'étude CAT Women.....		254
I.	Participant.es.....	255
II.	Protocole expérimental de l'étude CAT Women	255
III.	Travaux de thèse issus de l'étude CAT Women.....	257
ÉTUDE	Adaptations énergétiques au statut hormonal ovarien chez les athlètes féminines en haute charge d'entraînement. Résultats de l'étude CAT Women	258
DISCUSSION ET PERSPECTIVES GÉNÉRALES DU PROJET DE THÈSE.....		290
I.	Adaptations métaboliques et nutritionnelles à un épisode de perte et reprise de poids chez les athlètes habitués au « <i>weight cycling</i> ».....	291
II.	Statut hormonal ovarien et adaptations énergétiques chez les athlètes féminines	295
III.	Forces et limites.....	297
IV.	Conclusions et Perspectives	299
CONCLUSION GÉNÉRALE DU PROJET DE THÈSE.....		302
CONTRIBUTIONS PERSONNELLES ET VALORISATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE.....		304
I.	Publications scientifiques.....	305
II.	Communications.....	306
III.	Médiation et vulgarisation scientifique.....	307
IV.	Applications agro-alimentaires (<i>via</i> Nutrifizz)	307

V. Apparitions additionnelles	308
BIBLIOGRAPHIE	309
RÉSUMÉ	334

LISTE DES ABBRÉVIATIONS

95%IC : intervalle de confiance à 95%	MNG : masse non grasse
BIA : bio-impédance	p : p-value
CCK : cholécystokinine	P4 : progestérone
DEE : dépense d'énergie à l'exercice	PP : polypeptide pancréatique
DEPP : dépense d'énergie post-prandiale	PYY : peptide YY
DER : dépense d'énergie au repos	QR : quotient respiratoire
DET : dépense d'énergie totale	RED-S : déficit énergétique relatif dans le sport
DXA : ostéodensitométrie	SDM : déviation standard à la moyenne
E2 : 17 β -estradiol	SEM : erreur standard de la moyenne
FSH : hormone folliculostimulante	SM : symptômes menstruels
GLP-1: glucagon like peptide-1	SNA : activité du système nerveux autonome
GnRH : gonadotrophine	SNS : système nerveux sympathique
HC- : femmes n'utilisant pas de contraception hormonale	SPM : symptômes prémenstruels
HC+ : femmes utilisant une contraception hormonale	T3 : triiodothyronine
IMC : indice de masse corporelle	T4 : thyroxine
LEA : faible disponibilité énergétique	TA : thermogénèse adaptative
LH : hormone lutéinisante	$\dot{V}O_{2max}$: consommation d'oxygène maximale lors d'un effort maximal
MG : masse grasse	$\dot{V}O_{2pic}$: pic de consommation d'oxygène au cours d'un effort

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. ORDRE DE GRANDEUR DES CONCENTRATIONS EN 17B-ESTRADIOL ET PROGESTERONE SELON LES PHASES DU CYCLE MENSTRUEL ET LES METHODES DE QUANTIFICATIONS UTILISEES.	74
TABLEAU 2. TERMES POUVANT CARACTERISER LE CYCLE MENSTRUEL ET LEURS DEFINITIONS ASSOCIEES DANS LA RECHERCHE.	76
TABLEAU 3. TABLEAU SYNTHETIQUE DES DIFFERENTS TYPES DE CONTRACEPTION HORMONALE.....	79

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. VARIATIONS DES APPORTS ENERGETIQUES, DE MASSE GRASSE ET MASSE NON GRASSE LORS DES PERIODES DE SEMI-FAMINE (C12 A S24) ET DE REALIMENTATION (S24 A R20) CHEZ LES 12 VOLONTAIRES AYANT COMPLETE TOUTES LES PHASES DE L'EXPERIENCE DU MINNESOTA.	21
FIGURE 2. PROPORTION DE MASSE NON GRASSE PERDUE PAR RAPPORT AU POIDS PERDU EN FONCTION DE LA MASSE GRASSE INITIALE.	23
FIGURE 3. RELATION ENTRE LE « FAT OVERSHOOT » (EXCES DE MASSE GRASSE PAR RAPPORT AUX VALEURS INITIALES) ET LE TAUX DE MASSE GRASSE INITIAL (AVANT LA RESTRICTION ENERGETIQUE).	24
FIGURE 4. FOREST-PLOT REPRESENTANT LA COMPARAISON DU POIDS ENTRE DES GROUPES DE PERSONNES AYANT L'HABITUDE DE REALISER DES REGIMES ET DES PERSONNES N'EN REALISANT PAS.	26
FIGURE 5. ÉVOLUTION DU POIDS, DE LA MASSE GRASSE ET DE LA MASSE NON GRASSE AU COURS D'UN EPISODE DE « WEIGHT CYCLING » CHEZ LES ATHLETES.	33
FIGURE 6. SYSTEMES DE REGULATION DE LA PRISE ALIMENTAIRE.	40
FIGURE 7. MODIFICATIONS DES PARAMETRES DE L'APPETIT EN REPONSE A UN DEFICIT ENERGETIQUE AIGU.	42
FIGURE 8. MODELE THEORIQUE DE LA REGULATION DE L'APPETIT IMPLIQUANT L'ACTIVITE PHYSIQUE.	44
FIGURE 9. CONTROLE DE L'APPETIT A TRAVERS LE SPECTRE DU NIVEAU D'ACTIVITE PHYSIQUE.	45
FIGURE 10. MODELE CONCEPTUEL DE L'IMPACT DU NIVEAU D'ACTIVITE PHYSIQUE ET DE L'ACTIVITE PHYSIQUE SUR LE CONTROLE DE L'APPETIT, AVEC INTEGRATION DU SYSTEME DE RECOMPENSE (« FOOD REWARD »).	51
FIGURE 11. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES COMPARTIMENTS DE DEPENSE D'ENERGIE TOTALE.	53
FIGURE 12. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES SYSTEMES DE CONTROLE OPERANTS DANS LE CONCEPT D'AUTOREGULATION DE LA COMPOSITION CORPORELLE AU COURS DE LA PERTE ET REPRISE DE POIDS DANS L'EXPERIENCE DU MINNESOTA.	59
FIGURE 13. MODELE HYPOTHETIQUE DES PERTURBATIONS METABOLIQUES SURVENANT AU FIL DU TEMPS ET SUSCEPTIBLES D'AUGMENTER LE RISQUE D'ALTERATIONS METABOLIQUES CHEZ LES ATHLETES HABITUES AU « WEIGHT CYCLING ».	63
FIGURE 14. QUANTIFICATION DES VARIATIONS DE POIDS, DE LA MASSE GRASSE ET DE LA MASSE NON GRASSE ET REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES MECANISMES SUPPOSEMENT IMPLIQUES DANS L'ABSENCE D'OBSERVATION DE « FAT OVERSHOOT » CHEZ LES ATHLETES.	67
FIGURE 15. VARIATIONS DES CONCENTRATIONS DES HORMONES OVARIENNES ET MODIFICATIONS PHYSIOLOGIQUES ASSOCIEES AU COURS DES DIFFERENTES PHASES DU CYCLE MENSTRUEL DANS LE CADRE D'UN CYCLE OVARIEN MOYEN DE 28 JOURS.	73
FIGURE 16. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES ACTIONS ET IMPLICATIONS METABOLIQUES DU 17B-ESTRADIOL.	90
FIGURE 17. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE L'OBJECTIF GENERAL DU TRAVAIL DE RECHERCHE AINSI QUE LES AXES ET ETUDES QUI EN DECOULENT.	103
FIGURE 18. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU PROTOCOLE DE L'ETUDE WAVE.	107
FIGURE 19. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU PROTOCOLE DE L'ETUDE CAT WOMEN.	256
FIGURE 20. MODIFICATIONS DE LA COMPOSITION CORPORELLE ET ADAPTATIONS METABOLIQUES ET NUTRITIONNELLES EN REPONSE A UNE PERTE ET UNE REPRISE DE POIDS MODEREES CHEZ DES ATHLETES HABITUES AU « WEIGHT CYCLING ».	294

CONTEXTUALISATION

À l'heure des Jeux Olympiques d'été de Paris 2024, l'importance et les bienfaits de l'activité physique ont été, plus que jamais, mis en avant par les politiques publiques françaises et internationales dans un contexte de santé globale. En effet, la double dimension Santé et Performance de la pratique physique et sportive, qu'elle soit amateur ou de haut niveau, implique des mécanismes physiologiques. Plus particulièrement, de nombreux athlètes compétiteurs peuvent être engagés dans une gestion stricte de leur poids, questionnant cette possible dichotomie « Santé/Performance ». Alors que les régimes « yo-yo » sont communément décriés pour leurs répercussions métaboliques et nutritionnelles, les athlètes pratiquant un sport poids-dépendant (esthétique, à catégories de poids, d'endurance) peuvent être amenés à réaliser des pertes et reprises de poids successives tout au long de la saison sportive, appelées le « *weight cycling* ». Outre la restriction énergétique et l'augmentation du niveau d'activité physique, les athlètes ont parfois recours à l'utilisation de méthodes extrêmes (restrictions alimentaires sévères, jeûne prolongé, déshydratation, vomissements, etc.). Dans ce contexte, il apparaît primordial de s'intéresser aux effets du « *weight cycling* » sur la santé physiologique des athlètes habitués à de telles pratiques, pouvant dépendre non seulement du type de sport pratiqué, mais également du sexe de ces derniers.

Face à l'annonce historique d'une stricte parité athlètes féminins/masculins lors des Jeux Olympiques 2024, les sciences du sport et de l'exercice n'en sont pas encore à ce stade d'avancement. Les athlètes féminines ne représentent que 35% des sujets inclus dans les études dans ce domaine et seulement 6% des études sont dédiées spécifiquement à la population féminine (Costello et al. 2014; Cowley et al. 2021). La physiologie de l'athlète féminine s'avère pourtant extrêmement complexe au regard de leur statut hormonal ovarien, qu'il s'agisse du cycle menstruel naturel ou de l'utilisation de contraceptifs. Les multiples interrelations entre le statut hormonal ovarien, les variations pondérales, la charge d'entraînement et les régulations métaboliques restent encore peu connues à ce jour, d'autant que la diversité des approches méthodologiques limite les possibles conclusions.

Au regard de ces éléments, ce travail de thèse est centré sur les adaptations énergétiques en réponse aux variations de poids chez les athlètes et en fonction du statut hormonal ovarien chez les athlètes féminines. Dans un premier temps, un état de l'art des connaissances scientifiques sur les adaptations physiologiques aux variations de poids chez des individus sains non-athlètes sera réalisé, avant de questionner ces observations dans la population sportive. Puis, après avoir défini le statut hormonal ovarien, les modifications physiologiques que celui-ci peut engendrer chez les athlètes

féminines seront exposées. Dans un second temps, les objectifs de ce travail de recherche ainsi que les différentes études mises en place pour y répondre seront présentés. Dans un troisième temps, les études et leurs résultats seront exposés, avant de finir par une discussion générale mettant en avant les perspectives à envisager.

Enfin, il semble important de préciser que, dans l'ensemble des travaux présentés dans ce manuscrit de thèse, la distinction homme-femme se traduit par la différence de sexe biologique des individus et ainsi aux variations hormonales associées, et non pas à leur identité de genre. Le terme « femmes » sera ainsi utilisé pour désigner des femmes cisgenres (assignées femmes dès la naissance) et non pas transgenres (assignées à un autre genre à la naissance mais se considérant comme femmes).

REVUE DE LA LITTÉRATURE

CHAPITRE I

Adaptations métaboliques et nutritionnelles à la perte de poids : quels facteurs déterminants d'une reprise de poids *a posteriori* ?

Connaissances actuelles chez les individus normo-pondérés et questionnements chez les athlètes

I. Composition corporelle et perte de poids chez les athlètes

Principalement étudiées chez des personnes en situation de surpoids (indice de masse corporelle (IMC) entre 25,0 et 29,9 kg.m⁻²) ou d'obésité (IMC supérieur à 30,0 kg.m⁻²), les variations de poids peuvent engendrer des adaptations métaboliques et nutritionnelles majeures impliquées dans la régulation de la balance énergétique telles que des modifications de la dépense d'énergie, de la régulation des hormones de l'appétit ou encore de la composition corporelle (Blundell et al. 2015; Casanova et al. 2019). Toutefois, les adaptations impliquées dans ces réponses demeurent peu étudiées chez les individus sains normo-pondérés (IMC entre 18,5 et 24,9 kg.m⁻²) qui présentent pourtant une prévalence élevée à la réalisation de pertes de poids, les exposant à des adaptations augmentant les risques de reprise de poids (Montani et al. 2015; Pélissier et al. 2023a).

Dans la suite de ce document, la masse grasse (MG) désignera l'ensemble des lipides présents dans l'organisme (comprenant les lipides essentiels et de réserve) et, sauf mention contraire, la masse non-grasse (MNG) désignera tout de qui n'est pas de la MG (*i.e.*, eau corporelle, masse musculaire et protéines, organes et viscères, tissus osseux et conjonctifs et protéines) (Heymsfield et al. 2024).

I.1 Les phénomènes de « *weight and fat overshoots* »

I.1.1 L'étude du Minnesota, une étude de référence

Unique par sa méthodologie et son ampleur, l'étude du Minnesota, ou « *Minnesota Starvation Experiment* », a été conduite à la fin de la Seconde Guerre mondiale (1944 - 1945). L'objectif était d'examiner les effets physiologiques et psychologiques de la privation alimentaire, afin de guider les programmes de réhabilitation des personnes souffrant de malnutrition à la suite de la seconde guerre mondiale (Keys et al. 1950). Ainsi, 36 hommes sains normo-pondérés ont participé à cette étude longitudinale interventionnelle consistant en une perte de poids induite par semi-famine simulée, avant une période de réalimentation, dans un premier temps contrôlée puis *ad libitum*. Quatre grandes phases ont été ainsi établies (Keys et al. 1950) :

1. Une phase contrôle de 12 semaines, durant laquelle les volontaires ont reçu un apport énergétique quotidien contrôlé d'environ 3 200 kcal, considéré comme l'apport « idéal » pour maintenir leur balance énergétique équilibrée.

2. Une période de semi-famine de 24 semaines visant une perte de poids de 25% du poids de corps initial à la fin de cette période. La dynamique de perte de poids a été estimée à 1,1 kg par semaine *via* une équation de prédiction. Durant cette période, une balance énergétique négative a été induite chez les volontaires, en les limitant strictement à des apports énergétiques de 1 560 kcal par jour (soit 50% de leurs besoins) composés de 25% de protéines, 17% de lipides et 58% de glucides, à partir d'aliments accessibles en période de guerre en Europe (pain, céréales, pommes de terre, navets, quantités limitées en viande et produits laitiers), sans aucune autre source d'alimentation externe à l'étude.
3. Une période de 12 semaines de réalimentation contrôlée. Les volontaires ont été divisés en quatre groupes avec des niveaux caloriques différents (allant de 2 400 à 3 400 kcal.jour⁻¹, par échelons de 300 kcal.jour⁻¹) *via* l'augmentation des quantités d'aliments consommés. Chaque groupe a également été divisé en deux groupes avec ou sans supplémentation en protéines et/ou vitamines.
4. Enfin, trois hommes de chaque groupe (n = 12) ont continué le suivi au cours des huit semaines suivantes avec une réalimentation *ad libitum* (c'est-à-dire à volonté).

Tout au long du suivi, les volontaires ont été soumis à 15 heures d'activités professionnelles (administratif, cours à l'université) et personnelles (tâches ménagères) par semaine. Leur niveau d'activité physique était contrôlé et imposé dans le but d'assurer une dépense d'énergie totale (DET) journalière d'environ 3 000 kcal par jour, soit 35 kilomètres de marche par semaine (sur tapis ou en plein air) en plus de 30 minutes par semaine sur un tapis roulant à 5,6 km.h⁻¹ avec une pente de 10% (Kalm and Semba 2005).

Parmi les mesures réalisées, des données physiologiques (poids, masse grasse (MG), masse non grasse (MNG), dépense d'énergie au repos (DER)), nutritionnelles (apports énergétiques) et psychologiques (humeur) ont été recueillies en continu ou à différentes étapes du suivi.

1.1.2 Les phénomènes de « *weight et fat overshoots* »

Au vu de la rigueur du protocole expérimental, quatre volontaires sur les 36 initialement impliqués n'ont pas été retenus (non-respect des apports alimentaires en période de semi-famine) et seuls 12 individus ont réalisé la période complète de réalimentation (contrôlée et *ad libitum*). À la fin de la période de semi-famine, ces 12 volontaires ont perdu environ 24% (19% à 28%) de leur poids initial, avant de le reprendre et de dépasser leur poids contrôle de $+4,7 \pm 3,7\%$ à l'issue de la période de réalimentation. Ce phénomène de reprise de poids au-delà de la valeur initiale a été appelé « *weight*

overshoot » (Dulloo 2021). De plus, la reprise de poids, à l'issue de la période de réalimentation, fut caractérisée par un phénomène d'accumulation majorée de MG appelé « *collateral fattening* » conduisant à une reprise de MG dépassant également sa valeur initiale : le « *fat overshoot* » (+4 kg en moyenne par rapport à la période de contrôle, *minimum* : +0 kg ; *maximum* : +9 kg) ; tandis que la MNG fut restaurée à sa valeur initiale (Jacquet et al. 2020). Comme schématisée en **Figure 1**, la dynamique de variation de la composition corporelle illustre une accélération de la reprise de MG par rapport à la MNG dès la période de réalimentation. Cette désynchronisation de la restauration entre la MG et la MNG est appelé « *catch-up fat* ». Cette reprise préférentielle de MG, jusqu'à restauration complète de la MNG, serait finalement le résultat d'adaptations métaboliques et nutritionnelles en réponse à la perte de poids qui persisteraient en reprise de poids (Dulloo et al. 1996).

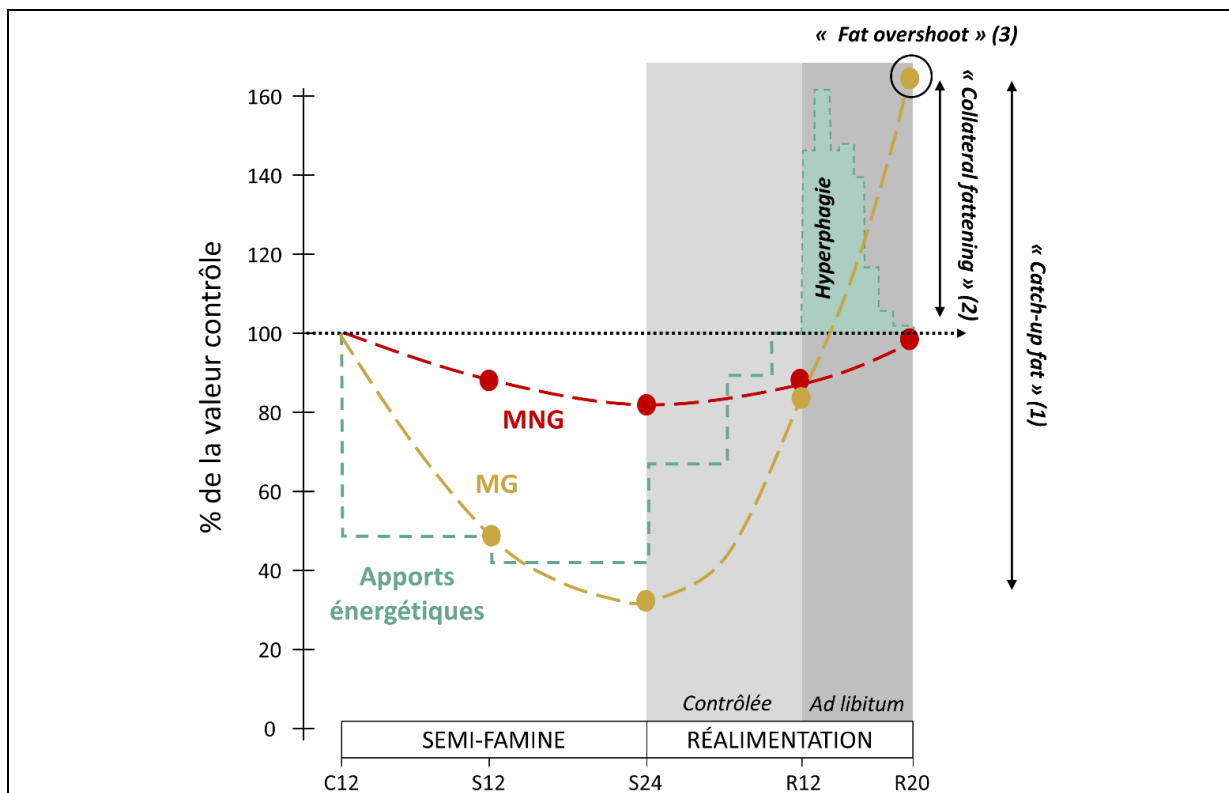


Figure 1. Variations des apports énergétiques, de masse grasse et masse non grasse lors des périodes de semi-famine (C12 à S24) et de réalimentation (S24 à R20) chez les 12 volontaires ayant complété toutes les phases de l'expérience du Minnesota.

- (1) Au cours de la période de réalimentation, une reprise de MG accélérée est observée (« *catch-up fat* »).
 (2) Ce « *catch-up fat* » persiste jusqu'à restauration de la MNG initiale, conduisant à un dépôt de MG collatéral (« *collateral fattening* »). (3) Ce « *collateral fattening* » entraîne une accumulation de MG supérieure à sa valeur initiale conduisant à l'observation d'un « *fat overshoot* ». MG : masse grasse, MNG : masse non grasse.

(Adapté de Dulloo et al. 1997).

I.1.3 Le contrôle intrinsèque de la répartition énergétique entre masse non grasse et masse grasse : le « *lean-fat energy partitioning* »

Analysée à de nombreuses reprises par le Professeur Dulloo et son équipe (1996, 1997, 1999, 2001, 2006, 2015, 2021), l'étude du Minnesota a permis de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans les régulations métaboliques et nutritionnelles en réponse à une perte et une reprise de poids chez des individus sains normo-pondérés. Ces analyses ont notamment mis en évidence un risque accru de développer un surpoids ou une obésité à la suite d'une restriction calorique sévère. Les mécanismes sous-jacents, suggérant un lien fort entre les composantes nutritionnelles, énergétiques et la composition corporelle lors des variations de poids, seraient ainsi responsables, en partie, de ces phénomènes de « *weight et fat overshoots* ».

La répartition énergétique entre les compartiments protéiques (c'est-à-dire la MNG) et lipidiques (MG) de l'organisme peut être estimée grâce au *P-ratio* (Payne and Dugdale 1977). Celui-ci est calculé à partir du ratio entre l'énergie protéique stockée (ou mobilisée) sur l'énergie totale stockée (ou mobilisée). Le *P-ratio* présente une importante variabilité inter-individuelle et, au contraire, une faible variabilité intra-individuelle, se traduisant notamment par un *P-ratio* en perte de poids corrélé à celui de la reprise de poids chez un même individu (Henry et al. 1988; Dulloo et al. 1996). En considérant l'énergie protéique mobilisée ou stockée comme étant le reflet de la perte ou le stockage de MNG dans un contexte de semi-famine, Dulloo et al. ont calculé le *P-ratio* à partir des variations de MG et de MNG (Dulloo et al. 1996). D'après une réanalyse combinant les résultats de l'étude du Minnesota à des données d'individus en situation d'obésité ayant réalisé une restriction calorique sévère (Henry et al. 1988), le pourcentage initial de MG serait le principal prédicteur (à plus de 85%) de la variabilité inter-individuelle du *P-ratio* lors d'une perte de poids (Dulloo et al. 1996). De ce fait, plus le pourcentage de MG initial est élevé, plus le *P-ratio* est bas, illustrant une proportion de MG mobilisée dans la perte de poids plus importante. Plus précisément, elle serait 2,5 à 3 fois plus élevée chez des individus ayant 8% contre 20% de MG (Dulloo and Schutz 2015). Ces résultats seraient en accord avec les précédentes observations de Gilbert Forbes ayant publié une série de modèles prédictifs indiquant que, dans la population non sportive, la composition du poids perdu par restriction énergétique et/ou repris suite à celle-ci est (logarithmiquement) liée à la MG initiale de l'individu (Forbes 1987). Ce modèle suggère que plus un individu présente une MG initiale faible avant la perte de poids, plus la proportion de poids perdu sous forme de MNG est importante (**Figure 2**).

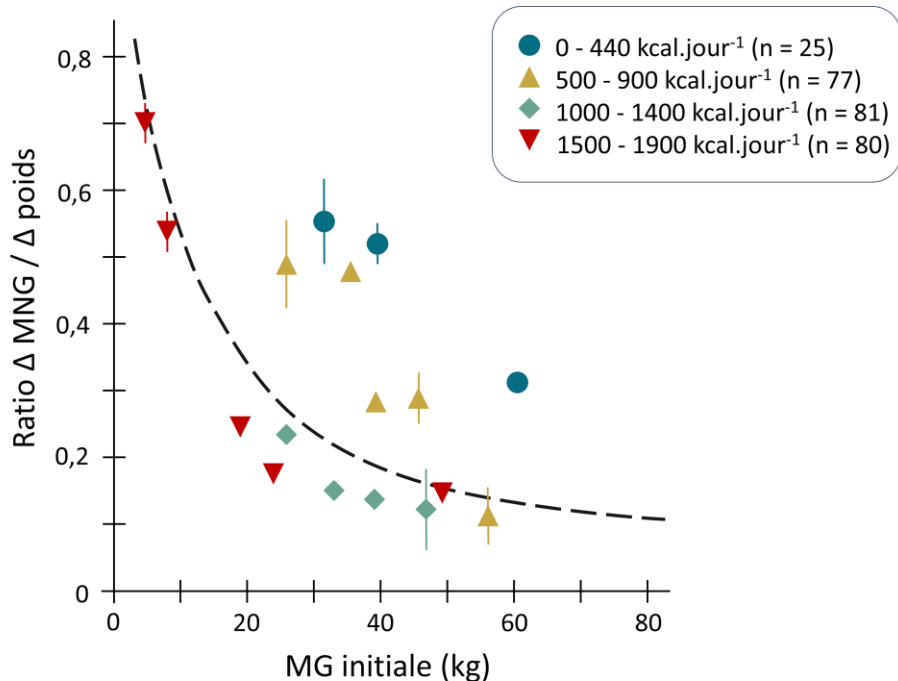


Figure 2. Proportion de masse non grasse perdue par rapport au poids perdu en fonction de la masse grasse initiale.

Les points correspondent à des moyennes de trois individus ou plus ayant réalisé une perte de poids induite par une sous-alimentation d'une durée minimale de 4 semaines, regroupés en fonction de leur apport énergétique (\pm erreur standard de la moyenne (SEM)). MG : masse grasse, MNG : masse non grasse.

(Adapté de Forbes 1987).

Ainsi, le pourcentage de MG initial retranscrirait une « mémoire de la répartition énergétique entre MNG et MG », appelée le « *lean-fat energy partitioning* », définissant la répartition de la mobilisation et l'utilisation de ces compartiments au cours de la perte et de la reprise de poids (Dulloo 2021). Finalement, par ce découplage énergétique, une moindre accrétion de la MNG limiterait la dépense d'énergie associée au coût élevé de sa synthèse et/ou de son maintien et favoriserait une augmentation de la MG (Dulloo et al. 2006). De manière intéressante, parmi les 12 participants ayant complété l'étude du Minnesota, Dulloo *et al.* ont constaté un « *fat overshoot* » plus important à l'issue de la période de réalimentation *ad libitum* chez les individus ayant un taux de MG initial plus faible en période contrôle (**Figure 3**) (Dulloo 2021). Ainsi, ces observations suggèrent que les individus normo-pondérés ayant une moindre adiposité pourraient présenter un risque de reprise de poids et de MG majorée à la suite d'une perte de poids induite par restriction calorique.

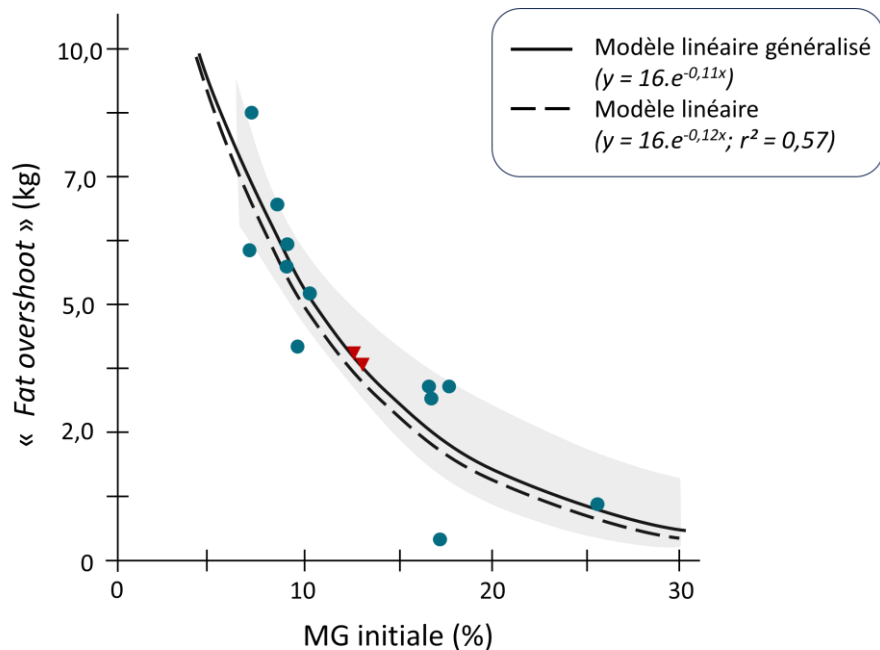


Figure 3. Relation entre le « *fat overshoot* » (excès de masse grasse par rapport aux valeurs initiales) et le taux de masse grasse initial (avant la restriction énergétique).

Les ronds bleus correspondent aux volontaires ayant complété l'étude du Minnesota (n = 12), pour lesquels deux courbes d'ajustement exponentielles ont été proposées. Les triangles rouges correspondent aux points de données des Rangers de l'armée américaine (moyenne sur n = 10 Rangers par point). MG : masse grasse.

(Adapté de Dulloo 2021).

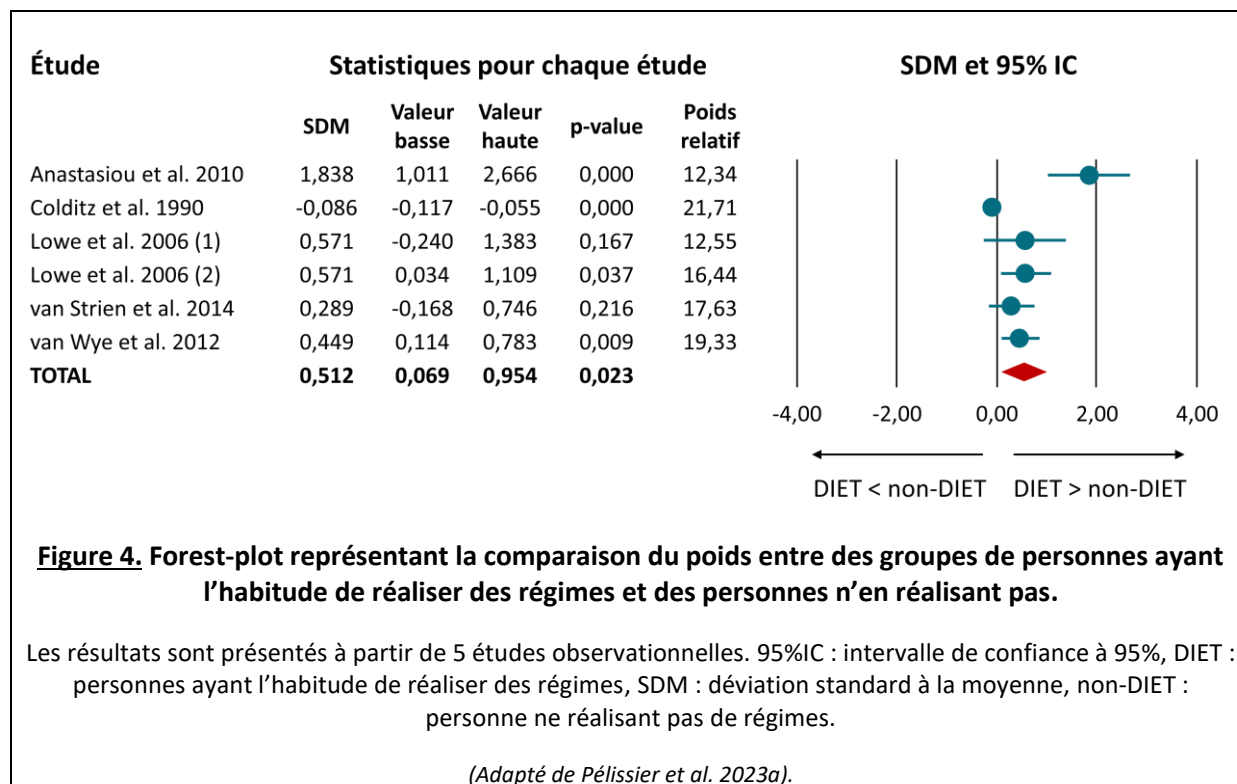
1.2 Évolution du poids et de la composition corporelle en réponse à une restriction énergétique dans la population générale : revue systématique et méta-analyse

Si elle a permis de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents de la régulation du poids en réponse à une restriction énergétique sévère chez des sujets sains normo-pondérés, l'étude du Minnesota s'est déroulée dans un contexte spécifique et dans des conditions extrêmes, ne reflétant pas les degrés et conditions de perte et reprise de poids de la population générale. Dans notre société actuelle, 8% à 32% des adultes sains normo-pondérés entreprennent des pertes de poids induites par des restrictions caloriques (Colditz et al. 1990; Korkeila et al. 1999; Lowe et al. 2006; van Strien et al. 2014; Palascha et al. 2015; Kärkkäinen et al. 2018; Sares-Jäske et al. 2019), motivés notamment par différentes pressions sociétales (publicité, insatisfaction de son image corporelle, etc.) (Mikolajczyk et al. 2010; Ordaz et al. 2018). Les études sur les pertes de poids dans la population normo-pondérée ont

mis en évidence une augmentation des risques de développer une obésité et des complications cardio-métaboliques liées aux fluctuations pondérales (Dulloo et al. 2006; Montani et al. 2006), bien que d'autres aient observé une amélioration des profils lipidiques et glycémiques, ou encore une diminution de la mortalité (Fontana et al. 2004). Étant donné la variabilité des résultats d'une étude à l'autre, notre équipe de recherche a réalisé une revue systématique et méta-analyse, accessible en **Annexe 1** (Pélissier et al. 2023a). L'objectif était de déterminer s'il existait un phénomène de « *weight et/ou fat overshoot* » chez des individus normo-pondérés réalisant des pertes de poids volontaires induites par restriction calorique.

Parmi les 8 études interventionnelles impliquant une perte de poids imposée par restriction énergétique sur une période de 3 à 24 semaines, 3 incluaient des réanalyses de l'étude du Minnesota ($-1\ 700\ \text{kcal}\cdot\text{jour}^{-1}$, -24% du poids initial) (Dulloo et al. 1996, 1997; Dulloo and Jacquet 1998) tandis que les 5 études restantes se sont intéressées à des restrictions caloriques moins importantes (-800 à $-1\ 000\ \text{kcal}\cdot\text{jour}^{-1}$) ayant induit des pertes de poids de $2,0\%$ à $8,4\%$ (Heyman et al. 1992; Roberts et al. 1994; Moriguti et al. 2000; Kajioka et al. 2002). Finalement, celles-ci ont mis en évidence un retour au poids initial 10 jours à 12 semaines après l'arrêt de la restriction calorique (*ad libitum*), sans observation d'un « *weight overshoot* », et les deux études ayant mesuré la MG n'ont pas observé de « *fat overshoot* » (Moriguti et al. 2000; Kajioka et al. 2002). Ces résultats semblent donc suggérer une importance du degré de perte de poids et de la sévérité de la restriction calorique au cours de celle-ci sur l'observation des phénomènes de « *weight et/ou fat overshoot* » sur le court et moyen terme.

En revanche, sur le plus long terme, les études observationnelles longitudinales (suivi sur plus de 8 mois post-perte de poids) suggèrent un risque de prise de poids supérieur à celui perdu associé à la pratique de régimes (c'est-à-dire la réduction des apports alimentaires dans un objectif de perte de poids) (Colditz et al. 1990; Korkeila et al. 1999; Lowe et al. 2006; Van Wye et al. 2007; Anastasiou et al. 2010; Pietiläinen et al. 2012; van Strien et al. 2014; Kärkkäinen et al. 2018; Sares-Jäske et al. 2019). Par exemple, Colditz et al. ont observé que des femmes ayant réalisé au moins une perte de poids de 5 kg ou plus par le passé présentaient une reprise de poids environ quatre fois supérieure par rapport à celles ayant réalisé des variations de poids moindres ($\leq 3\ \text{kg}$), sur une période de 8 ans (Colditz et al. 1990). En ce sens, la méta-analyse de Pélissier et al. a révélé que les personnes pratiquant régulièrement des régimes présentaient un poids plus élevé que les personnes n'en réalisant pas (Colditz et al. 1990; Lowe et al. 2006; Van Wye et al. 2007; Anastasiou et al. 2010; van Strien et al. 2014) (**Figure 4**).



Dans le cadre de la Finnish Health 2000 Survey, l’augmentation de l’IMC sur 11 ans était plus importante chez les personnes habituées à faire des régimes (+1,06 kg.m⁻²), d’autant plus si les sujets étaient normo-pondérés, par rapport à des personnes n’en réalisant pas (+0,74 kg.m⁻²) (Sares-Jäske et al. 2019). Toutefois, comme suggéré par Hebebrand & Hinney, le poids initial des individus ainsi que la prédisposition à la prise de poids sont des facteurs en partie attribuables à des facteurs génétiques ayant pu affecter les résultats observés (Hebebrand and Hinney 2009).

Afin de d’examiner sur la prise de poids associée à un régime restrictif est davantage liée à une prédisposition génétique qu’aux épisodes de perte de poids, Pietiläinen et al. ont rapporté l’évolution de l’IMC entre les 16 et 25 ans de 4 129 jumeaux Finlandais en fonction du nombre d’épisodes de pertes de poids intentionnelles (≥ 5 kg). Dans les paires monozygotes discordantes (c’est-à-dire les paires dans lesquelles un seul des co-jumeaux a réalisé des pertes de poids entre ses 16 et 25 ans) ayant un IMC similaire à l’âge de 16 ans, le co-jumeau ayant réalisé des variations de poids présentait un IMC finalement plus élevé à l’âge de 25 ans (+0,4 kg.m⁻²) que son co-jumeau n’en ayant pas réalisé. Un résultat similaire a été observé chez les jumeaux dizygotes : ceux ayant eu des épisodes de perte de poids intentionnelle affichaient une prise de poids progressive plus marquée que leurs co-jumeaux, avec des écarts d’IMC passant de 1,7 kg.m⁻² à 16 ans à 2,2 kg.m⁻² à 25 ans. Par ailleurs, les résultats ont mis en évidence qu’un IMC initial plus bas à 16 ans et un plus grand nombre d’épisodes de pertes de poids seraient associés à un IMC plus élevé à l’âge de 25 ans. Ainsi, les pertes de poids elles-mêmes

pourraient favoriser un risque accru de surpoids et d'obésité à long terme, indépendamment des facteurs génétiques, et particulièrement chez les individus ayant un IMC initial plus faible (Pietiläinen et al. 2012).

Dans leur récente revue narrative incluant des populations normo-pondérées, en surpoids et en situation d'obésité, Sanaya et al. n'ont pas observé d'effet délétère de la succession de variations de poids sur le poids et la composition corporelle (Sanaya et al. 2024). Toutefois, les auteurs soulignent le manque d'études sur le long terme et les différences méthodologiques en termes de mesure de la composition corporelle ou de l'activité physique entre les études, pouvant impacter les degrés de perte et reprise de poids. Bien qu'il soit difficile de déterminer si la prise de poids est une cause ou une conséquence de la réalisation de régimes, Anastasiou et al. ont observé que les personnes normo-pondérées ayant un pourcentage de MG plus élevé réalisaient plus d'épisodes de variations de poids (Anastasiou et al. 2010). En ce sens, Kajioka et al. ont imposé deux cycles de variations de poids d'environ 4 kg chacun à 5 femmes (maximum 1 200 kcal par jour pendant 30 jours pour chaque cycle, séparés de 14 jours). Lors du premier cycle, 72% de la perte de poids et 55% de la reprise de poids étaient constitués de MG. Au cours du second cycle, la MG représentait 59% de la perte de poids et 95% de la reprise de poids (Kajioka et al. 2002). Cela suggère une augmentation de l'adiposité avec la répétition des cycles de perte et reprise de poids *via* une modification du « *lean-fat energy partitioning* », pouvant augmenter les risques de développer un surpoids ou une obésité sur le long terme.

Cependant, si les études citées ont impliqué des individus réalisant des variations de poids par le biais de restrictions caloriques, leur méthodologie ne permet pas d'identifier clairement les méthodes de perte de poids utilisées, et notamment le niveau d'activité physique initial et au cours de la perte de poids des individus (Pélissier et al. 2023a). L'influence du niveau d'activité physique au cours d'une perte de poids reste en suspens, bien qu'en théorie, la pratique d'une activité physique pourrait contribuer à la préservation de la MNG, impactant ainsi le « *lean-fat energy partitioning* » et la reprise ultérieure de MG.

1.3 La pratique des variations de poids chez les athlètes : quels risques pour un « *fat overshoot* » ?

Principalement réalisées pour des objectifs de performance, les pertes et reprises de poids successives au cours d'une saison sportive, appelées « *weight cycling* », sont monnaie courante chez les athlètes (Trexler et al. 2014). À l'heure actuelle, il n'existe pas de définition universellement admise du « *weight cycling* » puisque les pratiques varient largement d'un individu à l'autre, et surtout, selon le type de sport considéré (Montani et al. 2015; Sanaya et al. 2024).

1.3.1 Le « *weight cycling* », une pratique courante sport-dépendante, non sans conséquences

De manière générale, le « *weight cycling* » peut être caractérisé par sa fréquence, sa durée, son degré (c'est-à-dire la quantité ou le pourcentage relatif de poids perdu et repris) et les stratégies employées, pouvant différer d'un sport à l'autre (Montani et al. 2006, 2015). D'après Sundgot-Borden & Garthe, jusqu'à 94% des athlètes de haut niveau pratiquant des sports à catégories de poids ont rapporté avoir entrepris des pertes de poids extrêmes pour atteindre leur poids de compétition (Sundgot-Borgen and Garthe 2011a).

Dans les sports artistiques (gymnastique, patinage, danse classique, *etc.*) où la minceur est considérée comme un critère favorable au jugement artistique et technique (O'Connor and Slater 2011; Montani et al. 2015), les athlètes ont tendance à maintenir un poids relativement bas tout au long de l'année. Ainsi dans ce type de sports, les pratiquants réalisent peu de variations de poids au cours de la saison sportive (Montani et al. 2015). Au contraire, les athlètes pratiquant du culturisme suivent généralement des programmes d'entraînements et alimentaires calibrés (c'est-à-dire avec des apports énergétiques et nutritionnels finement contrôlés quantitativement et qualitativement) pendant plusieurs mois pour la perte et la reprise de poids. Ceux-ci consistent en une période de « prise de masse » durant laquelle une prise de MNG va être recherchée et accompagnée d'une prise de MG ; suivie d'une période de « sèche » au cours des semaines précédant une échéance compétitive, dans l'objectif de perdre un maximum de MG tout en essayant de maintenir la MNG acquise (Halliday et al. 2014; Pardue et al. 2017). À l'issue de la compétition, une stratégie de « *reverse dieting* » est souvent pratiquée par ces athlètes en augmentant progressivement leurs apports alimentaires entraînant une reprise de poids progressive, tout en limitant la reprise de MG (Alwan et al. 2019). Selon Andersen et al., la perte de poids en amont d'une compétition de culturisme serait en moyenne de 6,8 kg sur une période de 5 à 6 mois suivi par une reprise de 6,2 kg à la fin de la saison sportive (Andersen et al. 1995).

Dans les sports d'endurance (course à pied, cyclisme, etc.), et d'autant plus dans les sports à « poids porté », une optimisation du rapport poids/puissance est recherchée (Sedeaud et al. 2014). Un faible poids, résultant de faibles taux de MG et d'une petite stature, constitue un avantage dans ce type de sport car il réduit le coût énergétique liés aux mouvements et minimise la production de chaleur (O'Connor and Slater 2011). Bien qu'ils maintiennent un poids relativement bas de manière chronique, les athlètes d'endurance réalisent parfois des pertes de poids pour atteindre un poids « cible » à l'approche d'échéances importantes (Melin et al. 2019). Une étude a notamment identifié un « IMC idéal » à atteindre pour maximiser les performances selon les disciplines sportives concernées, qui serait, par exemple, de 19 à 20 kg.m⁻² pour des marathoniens et coureurs du 10 000 m (Sedeaud et al. 2014).

Enfin, les sports à catégories de poids (sports de combat, haltérophilie, force athlétique, etc.), qui devraient en théorie favoriser l'égalité de corpulence entre les athlètes, incitent ces derniers à réaliser une perte de poids pré-compétition, souvent conséquente, afin de combattre dans la catégorie de poids inférieure à leur poids habituel et obtenir un avantage physique par l'optimisation de leur composition corporelle (O'Connor and Slater 2011). De ce fait, les athlètes pratiquant des sports à catégories de poids seraient plus de 80% à s'engager dans une perte de poids avant une compétition (Artioli et al. 2011; Montani et al. 2015), ce qui en fait les disciplines sportives les plus touchées par le « *weight cycling* ». Notamment, 41% des lutteurs américains universitaires réaliseraient des variations de poids entre 5 et 9 kg par semaine au cours de leur saison sportive (Steen and Brownell 1990; Pélissier et al. 2023b). De plus, 60% des athlètes de combat auraient déjà expérimenté des variations de poids rapides (Brito et al. 2012), définies par Khodaei et al. comme une perte d'au moins 5% du poids initial en 1 semaine ou moins (Khodaei et al. 2015). Caractérisés pour leurs pertes et reprises de poids rapides, ces athlètes utilisent principalement une restriction des apports alimentaires et hydriques strictes associée à une augmentation du niveau d'activité physique pour induire un déficit énergétique (O'Connor and Slater 2011). Toutefois, ces pratiques n'excluent pas l'utilisation de méthodes plus extrêmes telles que le recours à la déshydratation active (restriction hydrique (54,9%), entraînements dans des pièces chauffées (42,3%), utilisation de vêtements de sudation (34,3%) ou passive (saunas (30,9%), diurétiques (9,9%)) ; mais aussi le jeûne prolongé (34,3%), l'utilisation de laxatifs (11,7%), de pilules amincissantes (6,9%) ou du vomissement forcé (3,8%) (Bagot et al. 2024). Souvent initiées dès l'adolescence, les pertes de poids rapides sont des pratiques encouragées par une majorité d'entraîneurs et autres compétiteurs (Artioli et al. 2010; Pélissier et al. 2023b), pouvant interférer dans la croissance et le bon développement des athlètes (Smith et al. 1995; Caine et al. 2001; Boisseau 2012). Ces pratiques ne sont pas sans conséquences sur la santé et la performance physiques et mentales des athlètes à court, moyen et long termes (Horswill 1993; Saarni et al. 2006; Mendes et

al. 2013; Bagot et al. 2024; Lakicevic et al. 2024). Elles peuvent notamment entraîner des troubles cardio-métaboliques (Allen et al. 1977; Montani et al. 2015), des changements d'humeur (Lakicevic et al. 2024), des troubles alimentaires et des carences nutritionnelles (Sundgot-Borgen and Garthe 2011b), des troubles gastro-intestinaux (Bratland-Sanda and Sundgot-Borgen 2013), de la fatigue, du stress, une augmentation de la perception de l'effort (Zubac et al. 2018; Isacco et al. 2020), des blessures (Prouteau et al. 2006b; Pocecco et al. 2013), ou encore un risque de surpoids ou d'obésité (Saarni et al. 2006). Par ailleurs, Sundgot-Borgen & Garthe ont souligné que plus la réalisation perte de poids rapide est fréquente plus il devient difficile d'atteindre le poids cible, ce qui pourrait conduire à l'adoption de méthodes de plus en plus agressives par les athlètes pour y parvenir (Sundgot-Borgen and Garthe 2011a).

I.3.2 Reprise de poids et modification de la composition corporelle en réponse à la perte de poids chez les athlètes habitués au « *weight cycling* » : revue systématique et méta-analyses

À la vue des pratiques de perte de poids chez les athlètes et de leurs faibles pourcentages de MG comparativement à la population générale (Jeukendrup and Gleeson 2010), une perte de MNG pourrait survenir au cours de la perte de poids, d'après les courbes de Forbes, et engendrer un phénomène de « *fat-overshoot* » et un risque élevé de développer un surpoids ou une obésité à long terme. Cependant, comme mentionné par Miles-Chan & Isacco dans leur revue narrative, les athlètes présentent généralement un niveau d'activité physique plus élevés que la population générale, contribuant à un maintien de la MNG pendant la perte de poids et pouvant limiter les adaptations compensatoires (Miles-Chan and Isacco 2021). La MNG, jouant un rôle central dans le « *lean-fat energy partitioning* » et le phénomène de « *collateral fattening* », pourrait ainsi influencer la proportion et la composition du poids perdu puis repris chez ces derniers.

Compte tenu du nombre important d'études explorant la perte et reprise de poids chez les athlètes, une approche systématique et méta-analytique de la littérature a été réalisée par notre équipe de recherche afin d'explorer de manière exhaustive les preuves disponibles (Bagot et al. 2024). L'objectif principal de ce travail était d'observer l'évolution du poids et de la composition corporelle (MG et MNG) au cours d'un cycle de perte et de reprise de poids chez les athlètes habitués au « *weight cycling* », en prenant en compte le type de sport pratiqué et les méthodes utilisées. Plusieurs méta-analyses ont été réalisées afin de comparer les données avant la perte de poids, à la fin de la perte de poids et après la reprise de poids. Les critères et méthodes de sélection et d'évaluation de la qualité des articles, ainsi que les données extraites, sont détaillés en **Annexe 2** (Bagot et al. 2024).

Soixante-quatorze articles, regroupant 10 354 athlètes au total (90% d'hommes), ont été inclus dans l'analyse systématique, dont 34 dans la méta-analyse. Les études étaient réalisées principalement chez des athlètes pratiquant des sports à catégories de poids, tels que les sports de combat (judo, boxe, jiu-jitsu, art martial mixte, lutte ; n = 54 articles) ou de force (culturisme, force athlétique, fitness ; n = 11 articles), et 4 études ont inclus des sports de ces deux catégories à la fois. Les parties suivantes seront dédiées à la description et la discussion systématique et méta-analytique de cette littérature.

Le haut niveau d'activité physique et la préservation de la masse non grasse comme limites au phénomène de « collateral fattening » ?

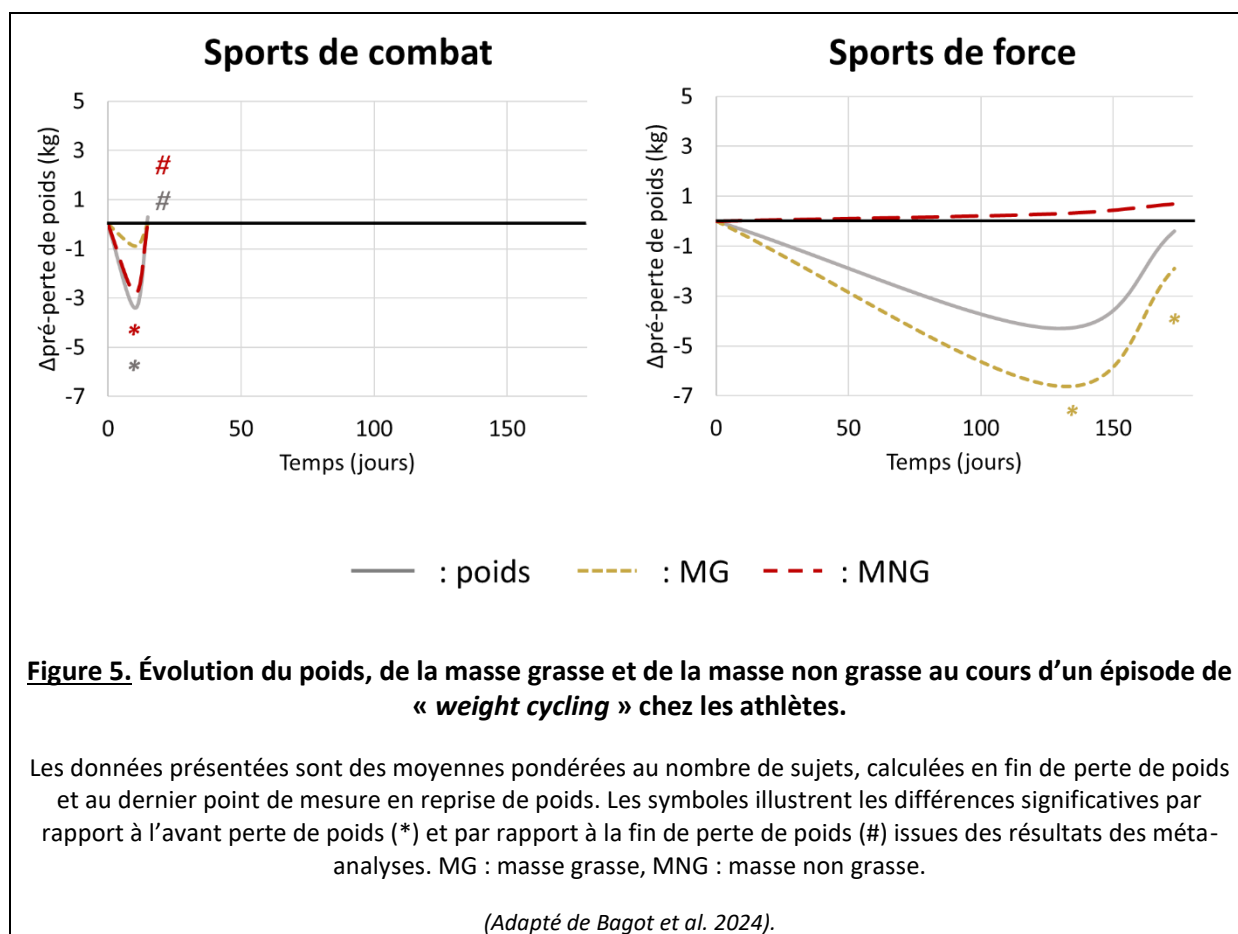
Qu'elles soient interventionnelles ou observationnelles, l'ensemble des pertes de poids dans les études incluses a été induit, *a minima*, par l'association d'une restriction calorique et de l'augmentation de la pratique d'une activité physique, selon les stratégies propres à chaque type de sport précédemment décrites (**Partie I.3.1**).

Parmi les 9 études portant sur les athlètes pratiquant des sports de force, 4 étaient des études de cas menées auprès de culturistes (Rossow et al. 2013; Halliday et al. 2014; Pardue et al. 2017; Tinsley et al. 2019). La perte de poids moyenne chez ces athlètes, estimée à $5,5 \pm 4,1\%$, a été observée sur une période allant de 1 à 7 mois. Puis, une reprise de poids moyenne de $5,6 \pm 3,5\%$ a été constatée sur une durée comprise entre 5 jours et 1,5 an (Andersen et al. 1995; Rossow et al. 2013). Les méta-analyses suggèrent que cette perte et reprise de poids s'accompagne d'une réduction puis d'une augmentation significative de la MG, tandis qu'aucune variation significative de MNG n'a été relevée (**Figure 5**) (Bagot et al. 2024). Ces observations pourraient être attribuées à l'utilisation de méthodes rigoureuses, impliquant une planification précise des entraînements (force, aérobie) et de la nutrition (apports énergétiques quantitatifs et qualitatifs) tant pour la phase de perte de poids que pour celle de reprise (Rossow et al. 2013; Halliday et al. 2014; Hulmi et al. 2017). Par exemple, dans l'étude de Hulmi et al., 27 athlètes féminines pratiquant du renforcement musculaire ont réalisé une perte de poids significative pour une compétition de $11,9 \pm 3,8\%$ en $19,8 \pm 3,6$ semaines (Hulmi et al. 2017). Celle-ci a été accompagnée d'une réduction de $50,4 \pm 12,4\%$ de la MG initiale, tandis que la MNG a été légèrement augmentée de manière non significative ($+1,1 \pm 3,1\%$). Dix-sept semaines après la compétition, ces athlètes ont repris $10,9 \pm 5,3\%$ de leur poids corporel et $84,7 \pm 50,7\%$ de la MG, tout en conservant des niveaux de MG inférieurs aux valeurs initiales, et sans modification significative de la MNG. Ces résultats ne semblent pas confirmer les modèles de répartition énergétique établis dans la population générale *via* les courbes de Forbes, qui, étant donné le faible pourcentage de MG initial chez les athlètes, prévoient une perte beaucoup plus importante de MNG et une reprise plus élevée

de MG (Miles-Chan and Isacco 2021). Ainsi, le niveau d'activité physique élevé en perte mais également en reprise de poids et la recherche d'une préservation de la MNG au cours de la perte de poids par les athlètes pourraient permettre une synchronisation de la récupération en MG et en MNG au cours de la reprise de poids *via* le « *lean-fat energy partitioning* », et limiter le « *collateral fattening* » (Miles-Chan and Isacco 2021).

Cependant, contrairement aux athlètes pratiquant des sports de force, nos méta-analyses ont révélé que les pertes et reprises de poids rapides, dans lesquelles sont engagés les athlètes pratiquant des sports de combat, sont généralement accompagnées d'une perte puis reprise significative de MNG et non de MG (**Figure 5**) (Bagot et al. 2024). Les athlètes pratiquant des sports de combat perdent en moyenne $4,6 \pm 2,3\%$ de leur poids, sur une période de 3 jours à 2 mois dans les études non-interventionnelles et en moins de 3 jours pour certaines études interventionnelles (Fogelholm et al. 1993; Oopik et al. 2002; Kondo et al. 2019, 2021). Comme mentionné précédemment (**Partie I.3.1**), la perte de poids rapide implique souvent, en plus de la restriction énergétique et de l'augmentation de l'activité physique, l'utilisation de méthodes extrêmes telles que la déshydratation sévère (Lingor and Olson 2010; Jetton et al. 2013; Ööpik et al. 2013). À l'issue de la perte de poids, la réalimentation et la réhydratation induisent une reprise de poids rapide moyenne de $5,5 \pm 2,4\%$ du poids corporel, $4,6 \pm 3,9$ jours après l'arrêt des restrictions (Artioli et al. 2010; Matthews et al. 2019). Dans leur étude, Reljic et al. ont suivi 10 boxeurs ayant perdu 3,7 kg en une semaine avant d'en reprendre 3,2 kg au cours des 7 jours post-compétition. Cette variation de poids a été induite par une restriction calorique ($-14 \text{ kcal.kg}^{-1}.\text{jour}^{-1}$; $-1,6 \text{ g.kg}^{-1}.\text{jour}^{-1}$ de glucides, $-0,7 \text{ g.kg}^{-1}.\text{jour}^{-1}$ de protéines et $-0,7 \text{ g.kg}^{-1}.\text{jour}^{-1}$ de lipides) et une déshydratation (sauna, augmentation de l'intensité des exercices, restriction des fluides de $-0,6 \text{ l.jour}^{-1}$ au cours de la perte de poids) transitoires, et a été accompagnée d'une perte et reprise significative d'environ 3 kg de MNG, sans modification significative de MG (Reljic et al. 2015). Il semblerait que, dans les sports à catégories de poids, la contribution de la MG aux pertes de poids soit faible. Ces pertes de poids seraient principalement attribuables à la réduction des réserves hydriques et du glycogène, entraînant ainsi une perte de MNG (O'Connor and Slater 2011; Reljic et al. 2015). Associée à une réalimentation et au maintien d'un haut niveau d'activité physique, la stratégie d'hyperhydratation au cours de la période de récupération pourrait conduire à une reprise de poids induite par un retour de la MNG à sa valeur initiale, sans observer de « *collateral fattening* » (Brito et al. 2012; Jetton et al. 2013; Benoist et al. 2014; Coswig et al. 2019). Cependant, une déshydratation prolongée et ses conséquences (augmentation de la fréquence cardiaque au repos, perturbation du flux sanguin rénal, blessures) peuvent persister jusqu'à 3 semaines après la reprise de poids (Matthews et al. 2019) et impacter la performance et la santé des athlètes sur le long terme (Casa et al. 2019).

Finalement, quelles que soient les méthodes employées ou le type de sport pratiqué (force ou combat), les méta-analyses comparant les données de poids et de composition corporelle avant perte de poids *versus* en reprise de poids n'ont pas mis en avant de « *weight* ou *fat overshoot* » (Figure 5). Bien qu'une reprise de MG a été observée chez les athlètes pratiquant un sport de force après l'arrêt de leur régime, celle-ci reste significativement inférieure à la valeur initiale (Bagot et al. 2024).



Dans la présente revue systématique, il apparaît que les études incluses sont centrées sur les sports à catégories de poids. Pourtant, les athlètes pratiquant d'autres types de sports effectuent également des variations de poids dans le cadre de leur pratique pour des questions de performance (Partie I.3.1). Notamment, bien que ces variations soient généralement moins importantes et sur des périodes plus longues que les athlètes pratiquant des sports à catégorie de poids, les athlètes d'endurance réalisent des pertes de poids avant leurs échéances pour atteindre un IMC « idéal » (O'Connor and Slater 2011; Sedeaud et al. 2014). D'après les modèles de répartition énergétique, leur

faible taux de MG initial pourrait laisser supposer que ces derniers sont exposés à un phénomène de « *fat overshoot* » à l'issue de leur reprise de poids. Dans l'étude de Silva et al., 70 athlètes pratiquant des sports d'équipe et d'endurance ont pris ou perdu au moins 1,5% de leur poids entre le début de leur saison sportive et leur période de compétition selon leur programme d'entraînement, spécifique à chaque sport (combinaison de séances de natation, cyclisme, course à pied et de résistance chez les triathlètes, etc.), et sans modification apparente de leurs apports énergétiques. Il a été observé que 95% du poids pris par le premier groupe d'athlètes était composé de MNG, tandis que 90% du poids perdu dans le second groupe était composé de MG (Silva et al. 2017). Silva et al. ont noté peu de relations entre le changement prédit (à partir de la courbe de Forbes) et le changement réel de la MNG. Ainsi, ces résultats semblent s'accorder avec les observations faites chez les athlètes pratiquant des sports à catégorie de poids, et ne semblent pas confirmer les modèles de répartition énergétique issues des courbes de Forbes chez les athlètes (Miles-Chan and Isacco 2021).

Toutefois, le peu d'études ayant mesuré le poids après une période de récupération chez des athlètes d'endurance émet des résultats divergents quant aux variations de poids, de composition corporelle ou encore d'apport et de dépense d'énergie, ne permettant pas de tirer de conclusion quant à l'effet de telles pertes de poids dans cette population (Heydenreich et al. 2017). Des études supplémentaires sont donc nécessaires pour investiguer les adaptations physiologiques aux variations de poids dans ce type de sport.

De manière générale, il peut être supposé que le haut niveau d'activité physique chronique chez les athlètes, maintenu voire accentué pendant les différentes phases du « *weight cycling* », et plus particulièrement en perte de poids, pourrait limiter l'augmentation de l'adiposité en phase de reprise de poids (Miles-Chan and Isacco 2021). Ces conclusions restent tout de même hypothétiques en raison de l'hétérogénéité des méthodologies employées en termes de nature des mesures, d'outils utilisés, de degrés de perte et reprise de poids, du sexe et de la durée de suivi, généralement sur le court terme, des athlètes.

L'effet sexe sur la composition corporelle en réponse à une perte et reprise de poids chez les athlètes

Au-delà du type de sport, l'effet du sexe semble peu considéré dans les études sur le « *weight cycling* ». Les athlètes féminines représentent une minorité de participants inclus dans les études portant sur les sciences du sport et de l'exercice (35%) (Costello et al. 2014) et sur le « *weight cycling* » chez les athlètes (10%) (Bagot et al. 2024). Pourtant, le dimorphisme sexuel avéré de composition corporelle, aussi bien en termes de quantité de MG et MNG qu'en leur localisation (Bredella 2017;

Huebner and Perperoglou 2020), pourrait influencer le « *lean-fat energy partitioning* ». Les hommes ont un taux de MG plus faible que les femmes et sont plus susceptibles d'accumuler de la MG viscérale au niveau abdominal, tandis que les femmes accumulent plus de MG au niveau périphérique (Wohlgemuth et al. 2021). Ces différences pourraient influencer la répartition des tissus au cours de la perte et reprise de poids. En ce sens, chez des athlètes pratiquant du renforcement musculaire soumis à une restriction calorique tout en maintenant un haut volume d'entraînement (≥ 10 séries par groupe musculaire par semaine), les femmes présenteraient une meilleure préservation de la MNG que les hommes au cours de la perte de poids (Roth et al. 2022). Ces observations suggèrent un effet du sexe sur le « *lean-fat energy partitioning* » au cours de la perte de poids, susceptible d'impacter la reprise de poids et/ou le « *catch-up fat* » au cours de la reprise de poids. Ainsi, les athlètes masculins pourraient être prédisposés à reprendre plus de MG que les athlètes féminines. Toutefois, comme précédemment mentionné, ce modèle de répartition suivant la courbe de Forbes ne semble pas applicable aux athlètes.

Dans leur étude, Isola et al. ont notamment mis en évidence une perte de MNG significative chez des culturistes masculins au cours des 20 semaines de préparation à leur compétition (environ $-2,5$ kg, soit -3% de la MNG initiale), tandis que celle-ci a augmenté chez leurs homologues féminines (environ $+1,2$ kg, soit $+2,3\%$ de la MNG initiale) (Isola et al. 2023). Bien que les hommes comme les femmes aient significativement perdu un pourcentage de MG similaire au cours des 20 semaines (environ -70% de la MG initiale), cette différence dans l'évolution de la MNG peut être attribuée au faible taux de MG initial chez les athlètes masculins ($15,7 \pm 4,7\%$) comparativement aux athlètes féminines ($26,1 \pm 5,4\%$). Après la reprise de poids, un retour aux valeurs initiales a été observé sans dimorphisme sexuel apparent. Toutefois, Isola et al. ont constaté que les athlètes masculins ayant perdu du poids pour leur compétition reprenaient plus de MG que le groupe contrôle (culturistes masculins non compétiteurs avec les mêmes caractéristiques anthropométriques et de composition corporelle initiales) n'ayant pas réalisé de variation de poids, tandis qu'aucune différence significative n'a été observée chez les femmes (Isola et al. 2023). De la même manière, Prouteau et al. ont observé une perte de poids chez des judokas féminins composée à 54% de MNG contre 68% chez les hommes, pouvant être expliquée par le taux de MG plus faible chez ces derniers (Prouteau et al. 2007). Toutefois, avec la reprise de poids post-compétition, les judokas masculins ont récupéré la moitié de la MG perdue avec un retour aux valeurs initiales de MNG, tandis que les judokas féminines ont continué à perdre de la MG et ont repris de la MNG au-delà des valeurs initiales (Prouteau et al. 2007).

Ainsi, les athlètes féminines perdraient plus de MG et moins de MNG que leurs homologues masculins, probablement en raison de leur pourcentage de MG initial plus élevé. Les athlètes masculins seraient ainsi plus susceptibles de présenter un « *catch-up fat* ». Toutefois, le faible nombre d'études

ne permet pas d'établir de conclusion certaine. L'effet du sexe sur l'évolution du poids et de la composition corporelle en réponse au « *weight cycling* » mériterait plus d'attention.

Les risques du « *weight cycling* » chez les athlètes sur le long terme

Tandis que les effets de la perte de poids sur la santé et la performance à court terme (c'est-à-dire à l'échelle d'un unique épisode de perte et reprise de poids) ont été très étudiés, seules quelques études ont exploré les conséquences à moyen et long terme (Sundgot-Borgen et al. 2013; Miles-Chan and Isacco 2021). Les temps de mesure, choisis dans les études pendant la période de reprise de poids, ne reflètent pas nécessairement la fin réelle de la reprise de poids. En effet, 39 études incluses dans notre analyse ont réalisé leurs mesures en reprise de poids (ou ont interrogé sur la reprise de poids de façon rétrospective) une semaine ou moins après la fin de la perte de poids (Oppliger et al. 2006; Artioli et al. 2010). Si certains auteurs n'ont pas observé de différence de poids entre le début et la fin de la saison sportive chez des athlètes pratiquant des sports de combats habitués au « *weight cycling* » (Brewer 1992; Oppliger et al. 2003; Ransone et al. 2004), deux autres études menées chez des lutteurs ont constaté des différences significatives, mais dans des directions opposées (McCargar and Crawford 1992; Utter and Kang 1998).

Dans leur étude de cas, Morehen et al. ont suivi un boxeur professionnel sur 11 épisodes de « *weight cycling* » nécessitant des pertes de poids allant de 9,8 à 17 kg. Ces derniers ont observé que l'athlète avait tendance à présenter une prise progressive de MG (passant de 12,5 à 16,1 kg de MG entre la 1^{ère} et la 11^{ème} compétition en 5 ans) et une réduction de MNG (passant de 69,8 à 67,5 kg de MNG entre la 1^{ère} et la 11^{ème} compétition), sans reprise de poids majorée apparente (Morehen et al. 2021). Ces observations mettent en avant une modification du « *lean-fat energy partitioning* » avec la pratique du « *weight cycling* » contribuant à un « *collateral fattening* » et un futur « *fat overshoot* » au fur et à mesure des épisodes de « *weight cycling* ». Par conséquent, l'hypothèse que le « *weight cycling* » pourrait prédisposer à la prise de MG et potentiellement de surpoids ou d'obésité sur le long terme chez les athlètes reste plausible (Miles-Chan and Isacco 2021).

Dans l'étude rétrospective de Saarni et al., le delta de l'IMC entre l'âge de 20 ans et 20 ans après la retraite sportive des athlètes a été calculé. En accord avec les observations précédentes, ce delta était significativement plus élevé chez les athlètes habitués au « *weight cycling* » durant leur carrière sportive (boxeurs, lutteurs, haltérophiles) (+5,2 kg.m⁻²) que chez les non-athlètes (+4,2 kg.m⁻²) ou les athlètes n'ayant pas pratiqué le « *weight cycling* » au cours de leur carrière (+3,3 kg.m⁻²). Ces observations ont mis en évidence un risque trois fois plus élevé de développer une obésité sur le long terme associée à la pratique du « *weight cycling* » (Saarni et al. 2006). À l'inverse, lors d'une étude

rétrospective, Marquet et al. n'ont pas observé d'effet de la pratique du « *weight cycling* » au cours de la carrière sportive sur l'IMC des athlètes à la retraite. Cependant, les auteurs ont noté que le niveau élevé d'activité physique post-carrière de ces athlètes pourrait avoir masqué ou limité les effets délétères associés à la pratique du « *weight cycling* » au cours de leur carrière sportive (Marquet et al. 2013). Ainsi, bien que ces résultats soient à prendre avec précaution étant donné leur caractère auto-rapporté, le niveau d'activité physique apparaît, de nouveau, comme un facteur confondant important à considérer.

POINTS CLÉS

- La perte de poids peut être associée à un risque de **reprise de poids** à moyen et long terme dans la population générale.
- L'étude du Minnesota a mis en évidence un risque de **reprise accélérée de MG** à l'arrêt d'une restriction calorique sévère (semi-famine) pouvant conduire à un « *fat overshoot* ».
- Les individus ayant un **pourcentage initial de MG plus faible** présentent un risque accru de **perte de MNG** au cours de la perte de poids, ainsi qu'un risque de **reprise de MG majoré** (« *collateral fattening* »).
- Le maintien d'un **haut niveau d'activité physique** au cours de la perte et de la reprise de poids chez les athlètes pourrait **atténuer le « *collateral fattening* »**.
- Le risque de prise de MG et la **prévalence du surpoids et de l'obésité sur le long terme** chez les athlètes ne sont pas à écarter.
- Il existe un manque de considération pour d'autres types de sports que ceux à catégorie de poids, dans lesquels des pertes de poids peuvent également être réalisées pour des questions de performance, conduisant au « *weight cycling* », tels que les **sports d'endurance**.
- Le peu d'études ayant considéré l'**effet du sexe** suggère qu'une différence homme-femme n'est pas à écarter et mérite d'y porter plus d'attention.

L'observation d'un « *collateral fattening* » chez les individus normo-pondérés résulte d'adaptations métaboliques et nutritionnelles compensatoires impliquées dans l'homéostasie de la balance énergétique et favorisant la reprise de poids, telles que des modifications du métabolisme

énergétique ou de la régulation nutritionnelle (Dulloo and Jacquet 1998; Blundell et al. 2015; Casanova et al. 2019). Le niveau d'activité physique élevé et le faible taux de MNG dans la population sportive, par rapport à la population non sportive, pourraient être des facteurs de prévention de ces mécanismes au cours des épisodes de « *weight cycling* ». Les parties suivantes seront dédiées à l'exploration de ces adaptations métaboliques et nutritionnelles susceptibles d'être impliquées dans la régulation de la composition corporelle en réponse aux variations de poids.

II. Adaptations nutritionnelles et modifications du profil alimentaire en réponse à la perte et reprise de poids chez les athlètes

II.1 Prévalence des troubles du comportement alimentaire chez l'athlète

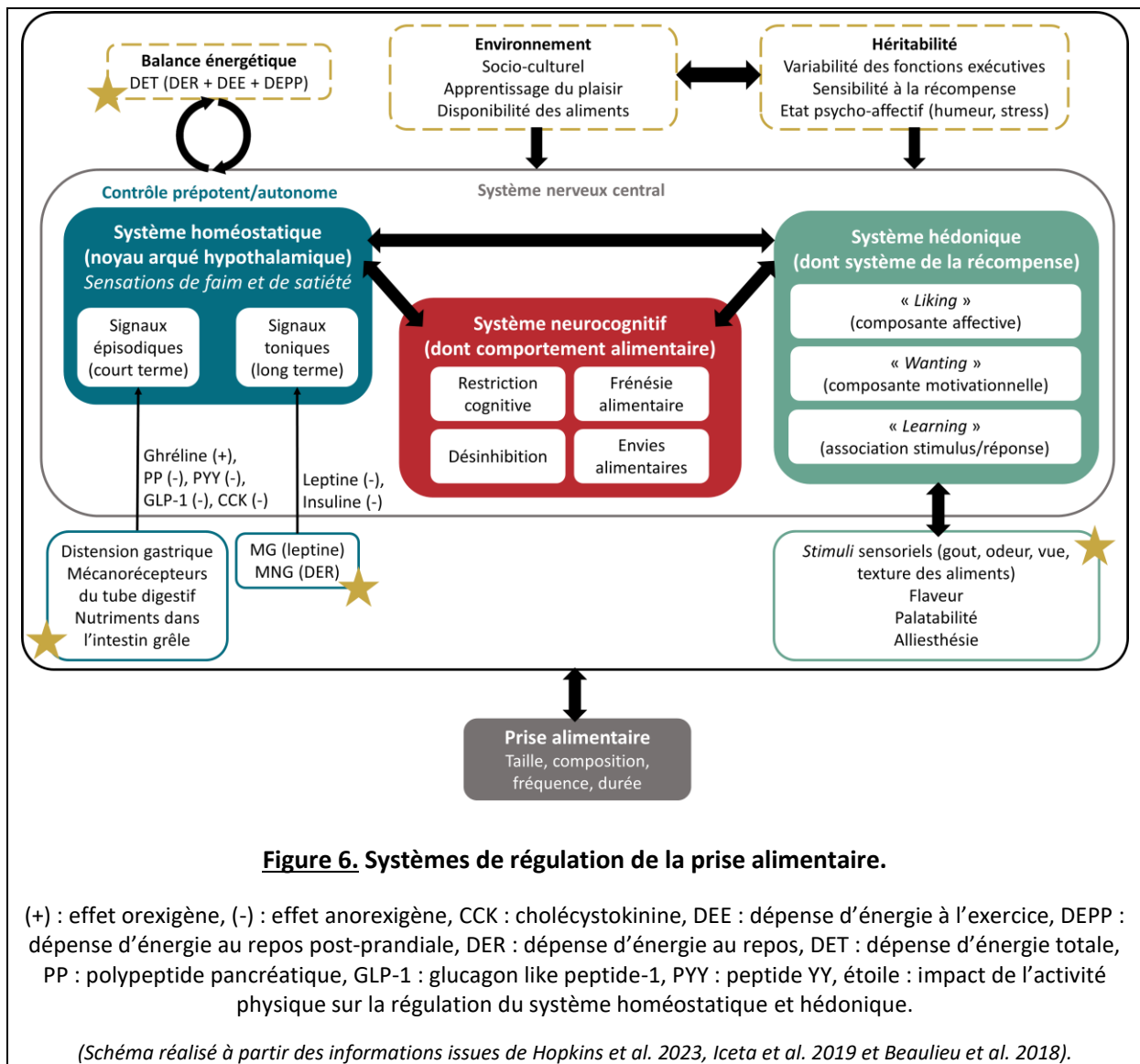
Les athlètes habitués au « *weight cycling* » peuvent réaliser jusqu'à 15 épisodes de pertes et reprises de poids par saison sportive, s'exposant ainsi à des risques de développer des troubles du comportement alimentaire et à des altérations du contrôle de l'appétit (Lakicevic et al. 2022; Bagot et al. 2024). Particulièrement étudiés chez les athlètes pratiquant un sport à catégories de poids, des épisodes réguliers de frénésie alimentaire (c'est-à-dire de prises alimentaires excessives sur une courte période, souvent accompagnées d'un sentiment de culpabilité et d'une perte de contrôle) ont été rapportés par plus de 50% d'entre eux tout au long de la saison sportive (Steen 1991; Oppliger et al. 2003; Pettersson et al. 2013; Beaulieu et al. 2018). La courte durée de récupération entre la pesée officielle et le début de la compétition, qui n'est que de 2 à 12 heures dans la plupart des sports à catégories de poids, augmente la prévalence d'un trouble hyperphagique à court terme (Sundgot-Borgen and Garthe 2011b). Ce dernier, pouvant être d'ordre compulsif à la suite de la restriction ou motivé par un désir de reprise de poids rapide afin de restaurer les stocks énergétiques et d'obtenir un avantage physique par rapport aux concurrents (O'Connor and Slater 2011), montre que la distinction entre un comportement conscient ou inconscient n'est pas toujours évidente.

Par ailleurs, les troubles alimentaires déclarés par les athlètes semblent persister même en dehors d'épisodes de « *weight cycling* », à court, moyen et long terme. D'après Doherty et al., 4 athlètes sur 5 pratiquant un sport de combat présenteraient toujours un comportement alimentaire altéré de façon modérée à sévère 7 jours après la fin de la perte de poids (Doherty et al. 2024). Bien que les athlètes soient engagés dans des pertes de poids rapides à des fins de performance lors de phases compétitives (Fogelholm et al. 1993), jusqu'à 38% d'entre eux présentent des comportements de frénésie alimentaire réguliers ou permanents pendant l'intersaison (Fogelholm 1994). À plus long

terme, seulement 72% des anciens athlètes de haut niveau ayant présenté des troubles du comportement alimentaire au cours de leur carrière sportive ont vu ces troubles disparaître 15 à 20 ans plus tard (Sundgot-Borgen et al. 2013). En outre, l'étude de Marquet et al. a montré que les troubles alimentaires sont significativement plus fréquents chez les athlètes retraités qui étaient habitués au « *weight cycling* » au cours de leur carrière sportive par rapport à leurs homologues qui n'en réalisaient pas (Marquet et al. 2013). Ainsi, les athlètes soumis à des cycles répétés de perte et reprise de poids semblent plus susceptibles de développer des troubles du comportement alimentaire que dans la population non sportive à long terme (Sundgot-Borgen and Torstveit 2004; Bratland-Sanda and Sundgot-Borgen 2013).

II.2 Mécanismes de régulation de la prise alimentaire en réponse à une perte et reprise de poids

La prise alimentaire est modulée par des mécanismes complexes, comprenant des systèmes homéostatiques et cognitivo-hédoniques intégrés dans le système nerveux central (**Figure 6**). Ces derniers assurent des régulations compensatoires en réponse à la perte de poids, ce qui peut conduire à des reprises de poids non synchronisées avec la perte. Les mécanismes sous-jacents, observés chez les individus normo-pondérés et sportifs, seront décrits dans les parties suivantes.



II.2.1 Régulation homéostatique de la prise alimentaire en réponse à la perte et reprise de poids

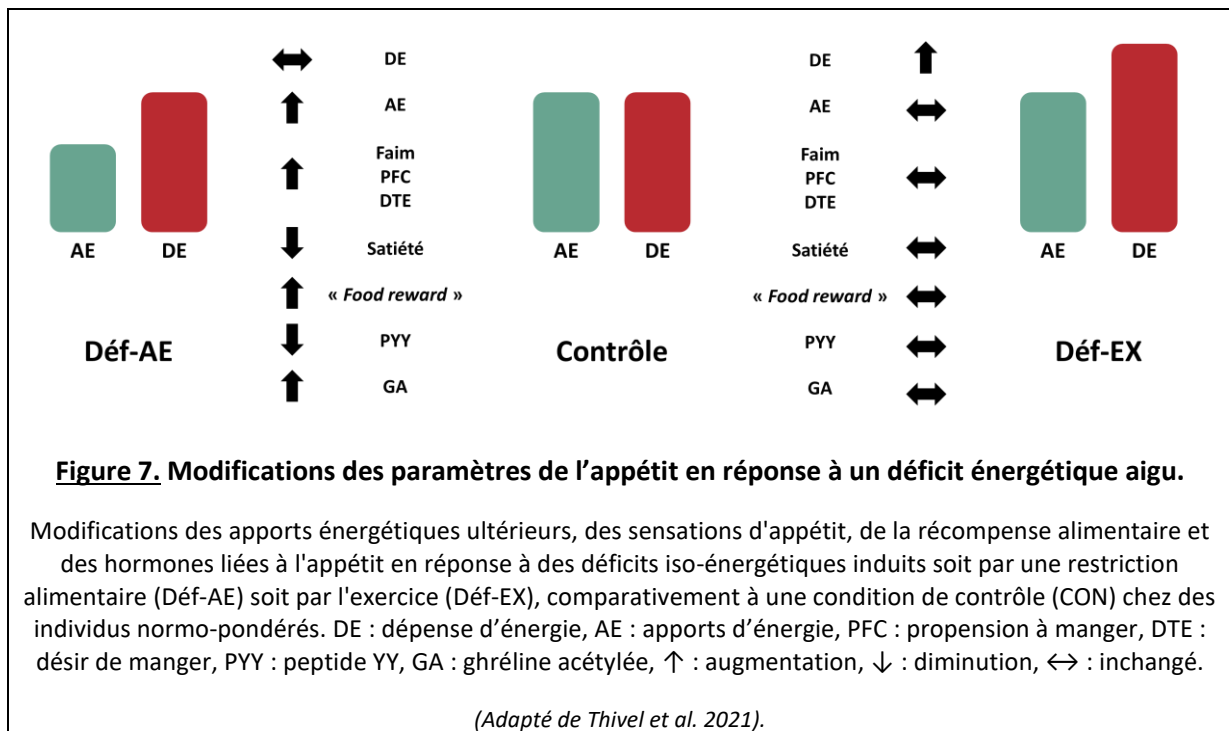
Le contrôle homéostatique, médié par le système périphéro-central *via* des signaux épisodiques et toniques, contribue au maintien de l'équilibre de la balance énergétique (**Figure 6**). Les signaux épisodiques interviennent à court terme selon une cascade de satiété, initiant et en réponse à un épisode alimentaire. Ils impliquent des hormones gastro-intestinales anorexigènes (c'est-à-dire réduisant l'appétit ; peptide YY (PYY), cholécystokinine (CCK), glucagon like peptide-1 (GLP-1)) et orexigènes (c'est-à-dire stimulant l'appétit ; ghréline) (Lowe and Levine 2005). Les signaux toniques, quant à eux, exercent un contrôle à plus long terme, reflétant les besoins énergétiques (notamment par rapport aux réserves énergétiques). La MNG serait le facteur principal de cette régulation tonique *via* le métabolisme de repos, qui est aujourd'hui reconnu comme le médiateur de l'effet de la MNG

sur la prise alimentaire, et la MG agirait dans une moindre mesure, par l'intermédiaire de l'adipokine leptine (comme signal du tissu adipeux et des stocks énergétiques associés) (Hopkins et al. 2023). Ainsi, ces signaux toniques ont un rôle à plus long terme et modulent la sensation de faim en fonction des besoins énergétiques (Beaulieu et al. 2018). En réponse à une perte de poids induite par restriction calorique et par l'activité physique, ces signaux peuvent être modifiés ce qui pourrait expliquer en partie les conséquences du « *weight cycling* » décrites dans la première partie de ce manuscrit.

Le rôle de l'activité physique dans la régulation des signaux homéostatiques et des sensations d'appétit en réponse à une perte de poids

Les mécanismes de régulation de l'appétit en réponse à une perte de poids chez les individus normo-pondérés, athlètes ou non, sont encore peu étudiés. Pour induire leur perte de poids, les athlètes habitués au « *weight cycling* » combinent la restriction énergétique avec une augmentation de leur niveau d'activité physique (Bagot et al. 2024).

La revue narrative de Thivel et al. a mis en évidence qu'un déficit énergétique aigu (24 heures à 3 jours) provoqué uniquement par l'exercice n'entraînerait pas de modifications ultérieures des sensations d'appétit, des hormones alimentaires, ni d'augmentation compensatoire de la prise alimentaire, contrairement à un déficit iso-énergétique induit par restriction énergétique seule chez des individus normo-pondérés non entraînés (**Figure 7**) (Thivel et al. 2021). Par exemple, King et al. ont comparé les régulations de l'appétit 9 heures après un déficit énergétique (environ 1 100 kcal) induit par l'exercice (90 minutes de course à 70% du volume d'oxygène consommé lors d'un effort maximal ($\dot{V}O_{2max}$)) ou par une restriction calorique chez 12 hommes normo-pondérés (King et al. 2011). Après la restriction énergétique, une augmentation de la prise alimentaire *ad libitum* et de la concentration de ghréline acétylée et une diminution de celle de PYY 3-36 (forme de PYY spécifiquement impliquée dans la réduction de l'appétit en inhibant les signaux orexigènes et activant les signaux anorexigènes) ont été observées, tandis que ces paramètres restaient inchangés après l'exercice. Ces observations ont été accompagnées d'une augmentation de la faim et de la propension à manger, ainsi que d'une réduction de la sensation de satiété lorsque le groupe avait bénéficié d'une restriction calorique, tandis ces effets n'étaient pas modifiés avec l'exercice seul. Ces résultats ont également été confirmés *a posteriori* chez des femmes (Alajmi et al. 2016). Sur le plus long terme, une restriction énergétique induite par l'activité physique sur 12 semaines ($-2\ 500\ \text{kcal}\cdot\text{semaine}^{-1}$) chez des personnes en situation de surpoids et d'obésité a entraîné une augmentation de la sensation de satiété, estimée par le calcul de quotients de satiété, comparativement à la période initiale (King et al. 2009).



En revanche, dans le cadre d'une perte de poids d'environ 6% induite par la combinaison d'une restriction calorique (-30% des apports énergétiques) et d'un exercice (+30% de la DET) chez 8 femmes inactives normo-pondérées, Koehler et al. ont observé une réduction de 37% de la concentration en leptine et de 13% de celle d'IGF-1 45 jours après le début de l'intervention, ainsi qu'une augmentation de plus de 30% de la concentration de ghréline après 90 jours (Koehler et al. 2017). À l'inverse, aucune modification n'a été observée dans le cadre de la perte de poids par l'exercice seul. Bien qu'aucune mesure des sensations d'appétit ou de la prise alimentaire post-perte de poids n'a été réalisée, ces observations soulignent l'importance de tenir compte des interactions entre les effets satiétogènes de l'exercice physique et orexigènes de la restriction calorique dans le cadre d'une perte de poids, pouvant moduler la prise alimentaire tant pendant qu'après la perte de poids.

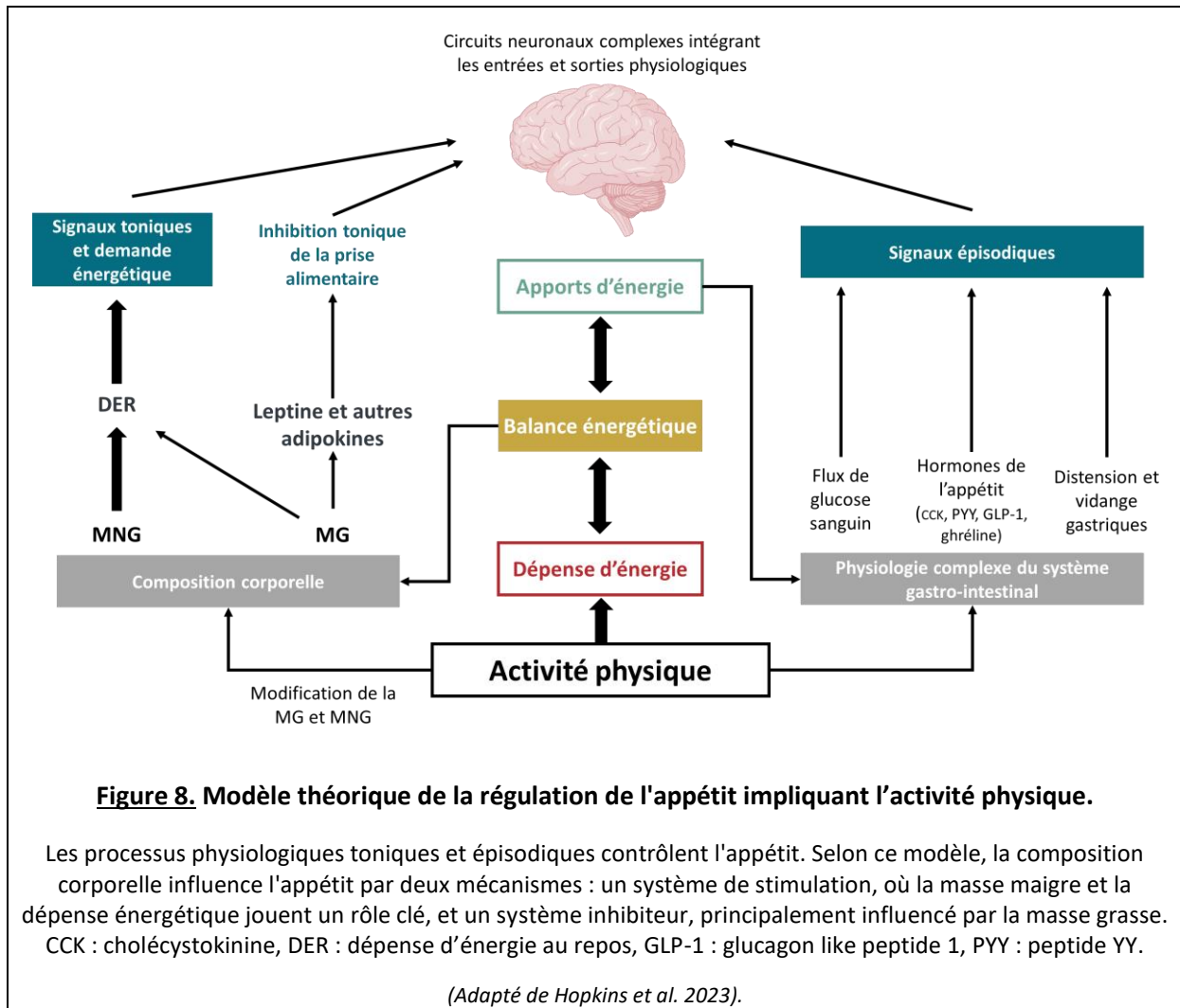
Dans l'étude du Minnesota, une augmentation significative de la faim a été observée durant la semi-famine, avant de diminuer progressivement au cours de la période de réalimentation (Stubbs and Turicchi 2021). Toutefois, à la suite de la période de réalimentation contrôlée, une augmentation significative et excessive des apports énergétiques a été observée en phase *ad libitum* chez les 12 volontaires (+2 000 kcal.jour⁻¹, soit +1 500 kcal.jour⁻¹ par rapport à la période contrôle) (Keys et al. 1950). Plus d'un tiers des sujets ont rapporté des pertes de contrôle de la prise alimentaire (Eckert et al. 2018), conduisant à des épisodes d'hyperphagie (c'est-à-dire la consommation récurrente de grandes quantités d'aliments en peu de temps, accompagnée d'une sensation de perte de contrôle)

(Attia and Walsh 2022). Cette suralimentation a persisté malgré un retour de la MG à sa valeur initiale et a duré jusqu'à la restauration de la MNG, entraînant un dépôt collatéral de MG (« *collateral fattening* ») (**Figure 1**) (Dulloo et al. 1997).

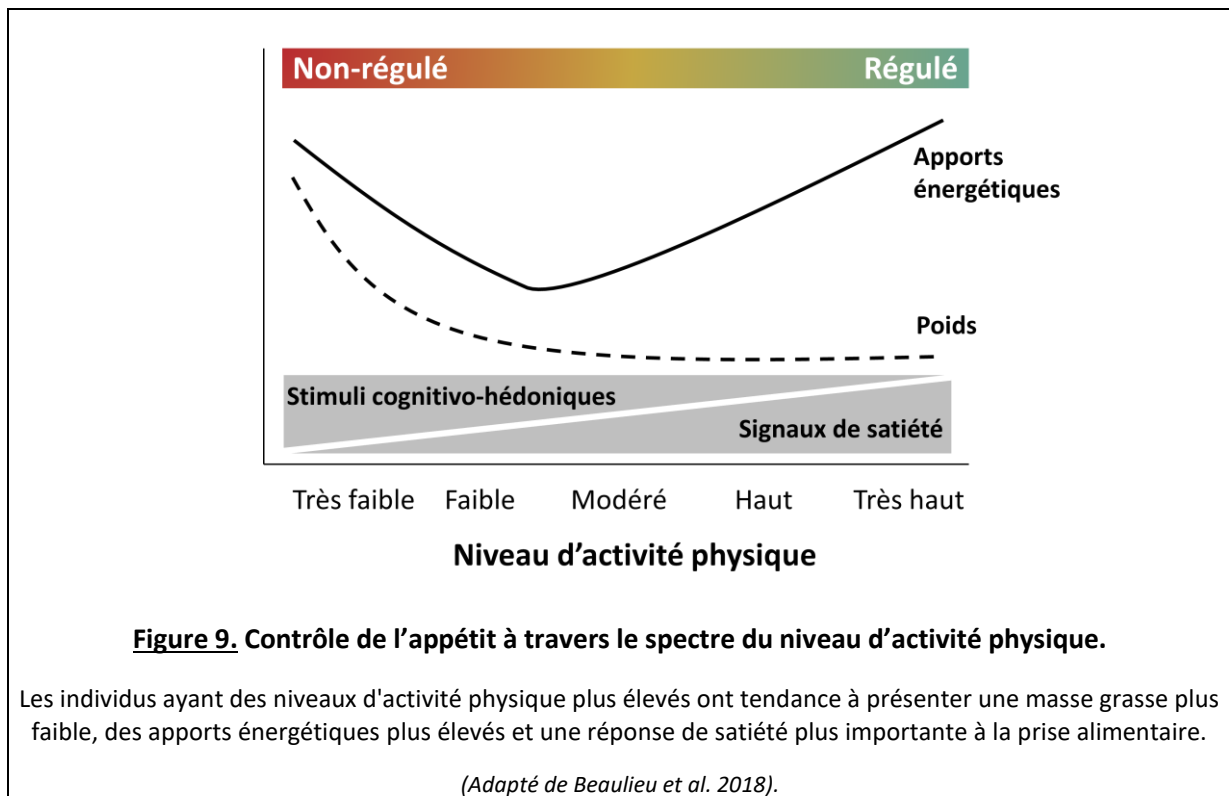
La masse non grasse comme déterminant de la prise alimentaire

En tant que principal déterminant de la DER (60 à 70%) (Casanova et al. 2019), la MNG aurait un rôle d'autant plus important dans la régulation de la balance énergétique, surpassant celui de la MG (Blundell et al. 2012). En effet, les analyses de Blundell et al. ont démontré une corrélation positive entre la MNG et les apports énergétiques ainsi que la faim, médiés par la DER, ce qui n'était pas observé avec la MG ou l'IMC (Blundell et al. 2012). La MNG aurait ainsi un rôle « passif » dans la régulation de la prise alimentaire. Cependant, dans le cadre d'une balance énergétique négative, certains auteurs ont mis en évidence que la MNG aurait également un rôle « actif » sur la prise alimentaire *via* des signaux toniques orexigènes pour limiter la perte de ces tissus (Dulloo et al. 1997; Stubbs et al. 2018). Notamment, les travaux de réanalyse de Dulloo et al. ont montré que trois facteurs expliqueraient 80% de la variabilité de la prise alimentaire à l'arrêt d'une restriction énergétique : le degré de déplétion en MG, le degré de déplétion de la MNG et le degré de déficit énergétique en amont de la réalimentation (Dulloo et al. 1997). La suralimentation dépendrait donc de boucles de rétroaction entre l'état de déplétion des compartiments de MG et de MNG et les centres régulateurs de la faim et de l'appétit situés dans le système nerveux central (Dulloo et al. 1997).

Chez les athlètes, il est plausible que le maintien de la MNG au cours de la perte de poids limiterait son rôle « actif » dans la régulation de la prise alimentaire. Récemment, Hopkins et al. ont de nouveau souligné l'importance de l'exercice physique dans le système homéostatique de la régulation de la prise alimentaire, par son implication à la fois dans la DER, mais aussi sur la composition corporelle comme illustré en **Figure 8** (Hopkins et al. 2023).



D'après les études menées par Blundell et al., l'apport énergétique en fonction des niveaux d'activité physique semble suivre une courbe en « J » (Blundell et al. 2020). Un haut niveau d'activité physique chronique influencerait le contrôle homéostatique de l'appétit par une action double (**Figure 9**) : i) en augmentant les apports énergétiques en réponse à une dépense énergétique plus élevée, et ii) en renforçant la satiété post-prandiale. Ainsi, les athlètes présenteraient une meilleure cohérence entre les apports et la dépense d'énergie *via* une meilleure intégration des signaux de faim et de satiété (Beaulieu et al. 2018).



À notre connaissance, aucune étude n'a mesuré les sensations d'appétit au cours d'un épisode de « *weight cycling* » chez les athlètes ; cependant, certaines se sont intéressées aux variations des hormones plasmatiques de l'appétit. Chez des athlètes pratiquant des sports de combat ou de force, une perte de poids d'au moins 4%, sur une période de 7 jours à 7 mois, a entraîné une diminution transitoire des taux d'insuline et de leptine et une augmentation de la ghréline (Degoutte et al. 2006; Prouteau et al. 2006a; Hulmi et al. 2017; Isola et al. 2023). Ces fluctuations hormonales pourraient contribuer à la reprise de poids observée 1 jour à 7 mois après l'arrêt de toute restriction (Müller et al. 2016), avant de retourner à leurs valeurs initiales sans observation de « *collateral fattening* ». Cependant, des études explorant les liens avec les aspects psychologiques et comportementaux de la prise alimentaire chez les athlètes sont manquantes.

Théoriquement, le taux de MNG supérieur chez les athlètes par rapport à la population générale et son maintien au cours de la perte de poids pourrait atténuer, voire supprimer, la réponse hyperphagique compensatoire observée chez les individus normo-pondérés (Roberts et al. 1994; Dulloo et al. 1997). Cependant, les méthodes d'évaluation auto-rapportées de l'hyperphagie ne permettent pas d'établir de manière claire un lien avec une reprise de poids ou la composition corporelle. À l'arrêt d'une perte de poids rapide, les épisodes de suralimentation peuvent survenir à très court terme. Par exemple, à la suite d'une perte de poids de 6% en 59 heures (-58% des apports

énergétiques, déshydratation) chez 10 athlètes de combat, Fogelholm et al. ont observé un épisode de suralimentation (+2 020 kcal en 5 heures, correspondant à leurs apports journaliers observés avant perte de poids), ayant induit une reprise de 73% du poids perdu (Fogelholm et al. 1993). En revanche, les études ne semblent pas mettre en évidence d'apports énergétiques excessifs une fois le poids et la composition corporelle retournés à leurs valeurs initiales (Brewer 1992; Reljic et al. 2015; Sagayama et al. 2019). Reljic et al. ont noté un retour des apports énergétiques à ceux de la période de poids stable 5 jours après l'arrêt d'une perte de poids chez 10 boxeurs (-3,5 kg, 7 jours, -56% des apports énergétiques), avant d'observer un retour du poids, de la MG et de la MNG à leurs valeurs initiales 2 jours plus tard (Reljic et al. 2015). Dans le cadre d'une perte de poids de près de 12% chez 25 athlètes féminines entraînées en résistance et avec des restrictions énergétiques moindres (-16% des apports énergétiques, +15% de l'activité physique, 21 semaines), aucun apport énergétique excessif n'a été rapporté au cours de la reprise de poids (18 semaines), avec un retour du poids et de la MNG aux valeurs initiales, mais pas de la MG (Sarin et al. 2019). Des observations similaires ont été faites dans le cadre d'études de cas chez des culturistes masculins et féminins (Rossow et al. 2013; Halliday et al. 2014; Pardue et al. 2017). Ainsi, le phénomène de suralimentation compensatoire ne semble pas observé chez les athlètes à l'issue de leur reprise de poids, indépendamment de leur composition corporelle.

II.2.2 Régulation neurocognitive de la prise alimentaire en réponse à la perte et reprise de poids

En parallèle de la régulation homéostatique de la prise alimentaire, des systèmes hédoniques et neurocognitifs interviennent (**Figure 6**). Le système hédonique est lié à la motivation et au plaisir associés à la consommation alimentaire, régulé par des circuits neuronaux impliquant le système de récompense du cerveau. Le contrôle cognitif implique, quant à lui, des processus inconscients mais aussi conscients tels que la prise de décision et la mémoire, influençant la consommation alimentaire en fonction des expériences passées et des connaissances nutritionnelles (Lowe and Levine 2005). Ces systèmes peuvent parfois prédominer sur les signaux homéostatiques, conduisant à une absence de prise alimentaire même en cas de besoins énergétiques, par exemple pour induire une perte de poids, ou à une prise alimentaire en l'absence de besoin énergétique, afin de (re)prendre du poids. Par conséquent, ces systèmes peuvent contribuer à des comportements alimentaires dysfonctionnels.

Importance du système cognitif sur la prise alimentaire au cours d'une perte et reprise de poids

Le contrôle neurocognitif intègre différentes composantes dont la restriction cognitive (c'est-à-dire un effort conscient de limiter la consommation alimentaire dans le but de contrôler son poids) et la désinhibition (c'est-à-dire la perte de contrôle sur l'alimentation en réponse à des stimuli émotionnels, sociaux ou environnementaux) (Herman and Mack 1975). Les principaux outils utilisés pour mesurer ces paramètres sont le « *Three Factor Eating Questionnaire* » (TFEQ) (Stunkard and Messick 1985) et le « *Dutch Eating Behavior Questionnaire* » (DEBQ) (Lluch et al. 1996). Le comportement de restriction cognitive ignore les sensations d'appétit et les besoins internes, mais se réfère à des règles externes et des restrictions alimentaires pour réguler la prise alimentaire, pouvant contribuer à un maintien ou une perte de poids. Couplée à une faible désinhibition, la restriction cognitive a été associée à des habitudes alimentaires bénéfiques et à une gestion réussie du poids chez des personnes en situation de surpoids ou d'obésité à court et à long terme (Sarlio-Lähteenkorva and Rissanen 1998; Johnson et al. 2012). Cependant, de nombreuses études ont mis en évidence un lien entre la restriction cognitive, les difficultés de régulation émotionnelle et une frénésie alimentaire susceptible être associée à une reprise de poids notamment chez les femmes (Drapeau et al. 2003; Chaput et al. 2009; van Strien et al. 2014; Sainsbury et al. 2019).

L'activité physique a récemment été décrite comme une stratégie efficace pour diminuer les troubles du comportements alimentaires, l'alimentation émotionnelle, la récompense alimentaire et l'apport énergétique chez les adolescents et adultes en situation d'obésité (Schwartz et al. 2017; Blanchet et al. 2018). Dans le cadre d'une perte de poids en réponse à une prise en charge multidisciplinaire (incluant de l'activité physique) sur 10 mois, l'équipe de Miguet et al. a mis en évidence une diminution significative des scores d'alimentation émotionnelle et externe mesurés à l'aide du DEBQ. Cependant, au cours des 24 heures de prise alimentaire *ad libitum* à l'arrêt de l'intervention de perte de poids, une augmentation de l'apport énergétique avait été constatée, et plus particulièrement chez les individus présentant une restriction cognitive importante (Miguet et al. 2019). Chez les athlètes, la pratique d'une activité physique au cours de la perte mais aussi de la reprise de poids pourrait limiter la restriction cognitive et ainsi, les risques de suralimentation à l'arrêt de la perte de poids (Niemeier et al. 2007). Dans la récente étude de Siedler et al., une restriction énergétique de 25% a été imposée à deux groupes de femmes entraînées en résistance, l'un en continu (6 semaines de restriction énergétique, n = 18) et le second en intermittence (2 semaines de restriction énergétique pour 1 semaine de pause pendant 8 semaines, n = 20), tout en maintenant leurs trois séances de musculation par semaine et un apport protéique de 1,8 g.kg⁻¹ de poids de corps (Siedler et al. 2023). Si aucun changement dans l'évaluation de la restriction cognitive, mesuré par le TFEQ, n'a été observé entre le début et la fin de l'intervention, une augmentation de la désinhibition a été

rapportée chez les femmes en restriction continue, alors qu'elle avait diminué dans le groupe intermittent (Siedler et al. 2023). Dans une étude similaire, Cheng et al. ont suggéré que la diminution de la désinhibition pendant une intervention de perte de poids pourrait prédire une perte de poids réussie sur une année (Cheng et al. 2014). Cependant, dans une récente revue systématique, Lakicevic et al. ont mis en évidence que l'état émotionnel des judokas se dégradait dans le cadre de pertes de poids rapide d'au moins 5% (Lakicevic et al. 2024). Ces modifications de l'état émotionnel pourraient être liées à la restriction cognitive au cours de la perte de poids et impacter la prise alimentaire à l'arrêt de la perte de poids, conduisant à des épisodes de frénésie alimentaire associés à une désinhibition (Macht 2008; Cardi et al. 2015; Evers et al. 2018; Reichenberger et al. 2020). En revanche, dans le cadre d'une reprise de poids plus longue observée chez les athlètes de force, la technique du « *reverse dieting* » (c'est-à-dire une augmentation lente et progressive des apports) requiert une discipline rigoureuse de la part des athlètes malgré une augmentation des sensations d'appétit (Greenway 2015). Cette méthode pourrait ainsi accroître leur restriction cognitive et les risques de perte de contrôle, augmentant le risque de reprise de poids ultérieure. Ces résultats mettent en évidence l'importance de prendre en considération la restriction cognitive et la désinhibition lors de la pratique du « *weight cycling* » chez les athlètes.

Modulation du système hédonique, ou « *food reward* »

Les régimes restrictifs peuvent altérer la sensibilité dopaminergique, augmentant la réactivité aux *stimuli* alimentaires hédoniques et pouvant entraîner une surconsommation lors de la reprise de poids (Heatherton and Wagner 2011). Le système hédonique du contrôle de la prise alimentaire correspond principalement au système de récompense, aussi appelé « *food reward* ». Celui-ci peut être défini par « le plaisir momentané et la motivation à ingérer un aliment qui est vu ou goûté » et englobe les processus neurobiologiques influençant les choix alimentaires et la quantité de nourriture consommée (Finlayson et al. 2007; Oustric et al. 2018). Le « *food reward* » comprend deux sous-composantes distinctes : le « *liking* » (plaisir sensoriel ressenti lors de la consommation d'un aliment) et le « *wanting* » (envie de manger déclenchée par un signal alimentaire) (Oustric et al. 2018; Iceta et al. 2019). Ces composantes peuvent être évaluées de manière implicite ou explicite : le « *liking* » explicite représente l'expérience hédonique, le « *wanting* » explicite correspond à un désir conscient de consommer un aliment spécifique, tandis que sa contrepartie implicite (« *wanting* » implicite) désigne la pulsion de manger un aliment spécifique déclenchée par des stimuli alimentaires, jouant un rôle important dans la suralimentation (Oustric et al. 2018; Beaulieu et al. 2020).

La mesure de la récompense alimentaire, par exemple avec la tâche cognitive informatisée qu'est le « *Leeds Food Preference Questionnaire* » (LFPQ), dont la version française a été récemment validée par notre équipe (Thivel et al. 2023), permet d'évaluer ces dimensions et leur influence sur la gestion du poids (Finlayson et al. 2007). Chez des personnes en situation de surpoids et d'obésité, une restriction énergétique aigue (jeûne de 24 heures à 3 jours) augmenterait le « *liking* » et le « *wanting* » pour les aliments à haute valeur énergétique (Griffioen-Roose et al. 2012; Cameron et al. 2014; Masic and Yeomans 2017). Ainsi, dans un contexte de perte de poids rapide, les athlètes pratiquant le jeûne pourraient présenter des adaptations similaires, favorisant une reprise de poids. *A contrario*, une perte de poids sur le plus long terme (au moins 8 semaines) entraînerait un changement du « *liking* » vers les aliments plus faibles en énergie, favorisant une perte de poids plus importante (McVay et al. 2016; Oustric et al. 2018). Dans l'étude du Minnesota, les participants ont présenté une augmentation de la sensation de palatabilité au cours de la période de semi-famine, mesurée par une échelle de Likert, avant de disparaître à la fin de la reprise de poids (Stubbs and Turicchi 2021). Toutefois, ces modifications pourraient durer sur le long terme et ainsi engendrer des difficultés à maintenir un poids réduit à l'arrêt d'une restriction énergétique. Après avoir induit une perte de poids de 4,8% sur 4 mois chez des athlètes retraités (43 ± 9 ans) en situation d'obésité, Nunes et al. ont observé une réduction du « *liking* » et « *wanting* » pour les aliments palatables à la fin de la perte de poids, qui était toujours présente chez les individus ayant maintenu la perte de poids 8 mois plus tard (Nunes et al. 2022a). Par ailleurs, une corrélation a été observée tout au long du maintien du poids entre le « *wanting* » explicite pour les aliments palatables et gustatifs, moteur d'une surconsommation énergétique excessive, et le degré de perte de poids.

Dans l'étude susmentionnée de Cameron et al. (**Partie II.2.1**), les réponses olfactives et de récompense alimentaire à des déficits énergétiques ont été examinées (Cameron et al. 2016). Le seuil de détection des odeurs était plus élevé chez les individus ayant eu une restriction calorique par rapport à leur condition initiale, ce qui n'était pas observé dans le cadre d'un déficit iso-énergétique induit par l'exercice. Ceci suggère l'implication de facteurs sensoriels dans l'augmentation de la prise alimentaire compensatoire et des sensations d'appétit induites par restriction calorique, mais pas par l'exercice. Une valeur relative de renforcement alimentaire (c'est-à-dire à quel point un *stimulus* peut soutenir un comportement alimentaire) (Stojek and MacKillop 2017) plus élevée a été observée après 3 jours de déficit alimentaire par rapport à la condition contrôle, et d'autant plus en réponse au déficit induit par l'exercice (Cameron et al. 2016). Ces résultats indiquent un potentiel découplage entre la récompense alimentaire et la consommation énergétique effective à la suite de l'exercice, nécessitant des études supplémentaires pour mieux comprendre les effets de l'exercice sur le contrôle hédonique de la prise alimentaire (Thivel et al. 2021).

De manière intéressante, l'exercice semble ne pas engendrer de modification de la récompense alimentaire et pourrait s'accompagner de changements positifs dans les préférences alimentaires, conformément à des améliorations du contrôle de l'appétit (Oustric et al. 2018; Beaulieu et al. 2020). En effet, que ce soit chez des individus normo-pondérés ou en situation de surpoids ou d'obésité, les études observationnelles montrent que la pratique d'une activité physique modérée à vigoureuse est associée à une diminution du « *liking* » et du « *wanting* » pour les aliments denses en énergie, et à une augmentation du « *liking* » pour les aliments à faible densité énergétique (Horner et al. 2016; Beaulieu et al. 2017). Ces résultats, soutenus par des études imposant des programmes d'exercice physique chroniques, pourraient refléter une amélioration du contrôle de l'appétit. Lorsque l'entraînement physique conduit à une perte de poids, une dissociation entre le « *liking* » et le « *wanting* » est constatée. Celle-ci est marquée par une réduction du « *wanting* » pour les aliments denses en énergie et une augmentation du « *liking* » pour les aliments à faible densité énergétique (Thivel et al. 2020). Toutefois, cette diminution de la récompense alimentaire en réponse à l'exercice a tendance à être observée chez des individus initialement inactifs, montrant un « *liking* » et un « *wanting* » accrus pour les aliments denses en énergie, et non chez les individus déjà actifs (Beaulieu et al. 2020). Ainsi, Beaulieu et al. ont proposé une association entre le niveau d'activité physique et le « *food reward* », suggérant que les athlètes pourraient présenter un meilleur contrôle hédonique de l'appétit que la population générale (**Figure 10**) (Blundell et al. 2020).

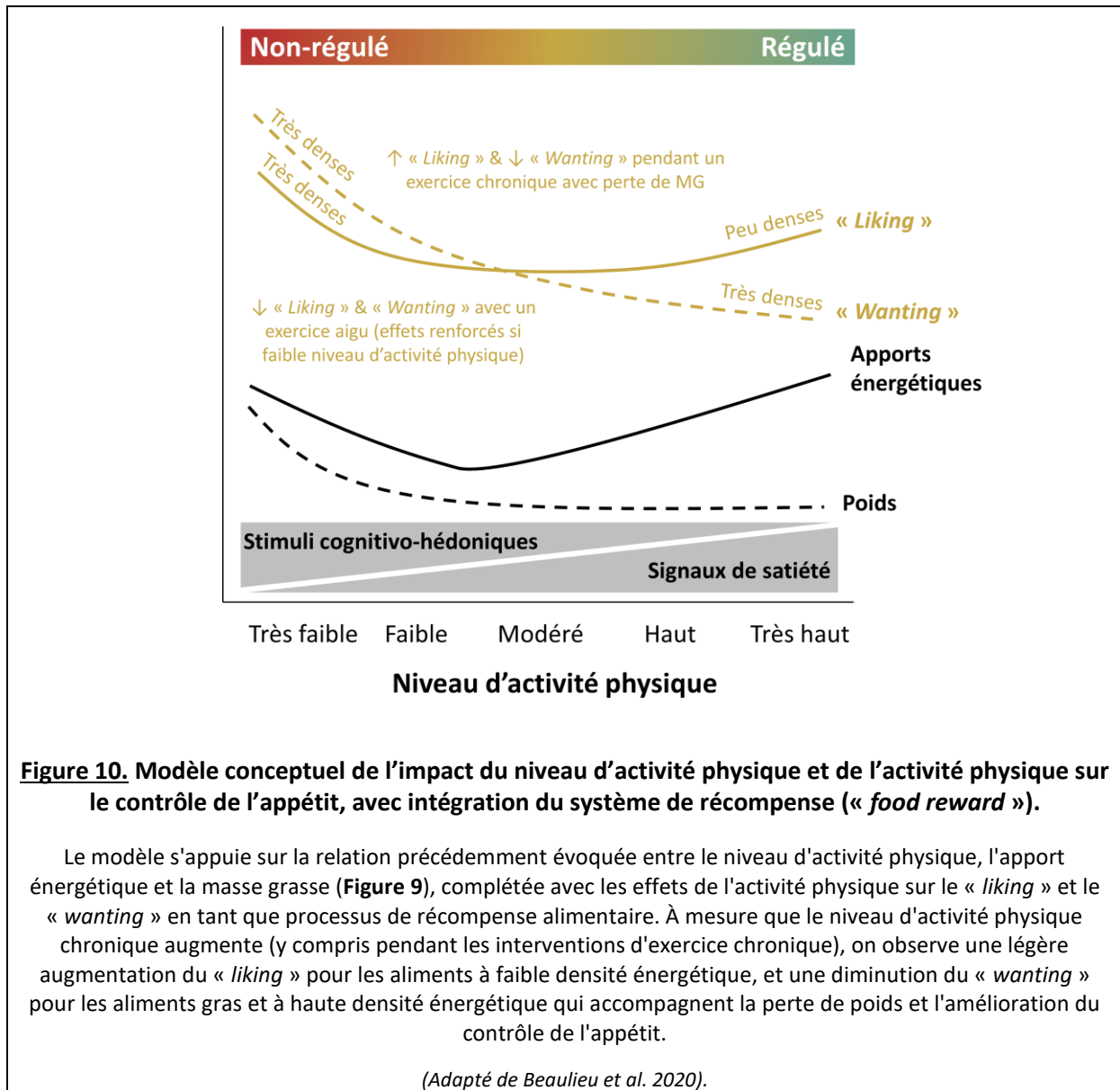


Figure 10. Modèle conceptuel de l'impact du niveau d'activité physique et de l'activité physique sur le contrôle de l'appétit, avec intégration du système de récompense (« food reward »).

Le modèle s'appuie sur la relation précédemment évoquée entre le niveau d'activité physique, l'apport énergétique et la masse grasse (Figure 9), complétée avec les effets de l'activité physique sur le « liking » et le « wanting » en tant que processus de récompense alimentaire. À mesure que le niveau d'activité physique chronique augmente (y compris pendant les interventions d'exercice chronique), on observe une légère augmentation du « liking » pour les aliments à faible densité énergétique, et une diminution du « wanting » pour les aliments gras et à haute densité énergétique qui accompagnent la perte de poids et l'amélioration du contrôle de l'appétit.

(Adapté de Beaulieu et al. 2020).

Finalement, comme suggéré par Miles-Chan & Isacco, le haut niveau d'activité physique et la régulation volontaire de la prise alimentaire adoptée par certains athlètes pourraient atténuer la suralimentation inconsciente qu'est l'hyperphagie (Miles-Chan and Isacco 2021), mais la prévalence des athlètes aux troubles du comportement alimentaire à l'arrêt de leur carrière sportive (Sundgot-Borgen and Torstveit 2004) pourrait, à plus long terme, aggraver ou retarder le « collateral fattening ».

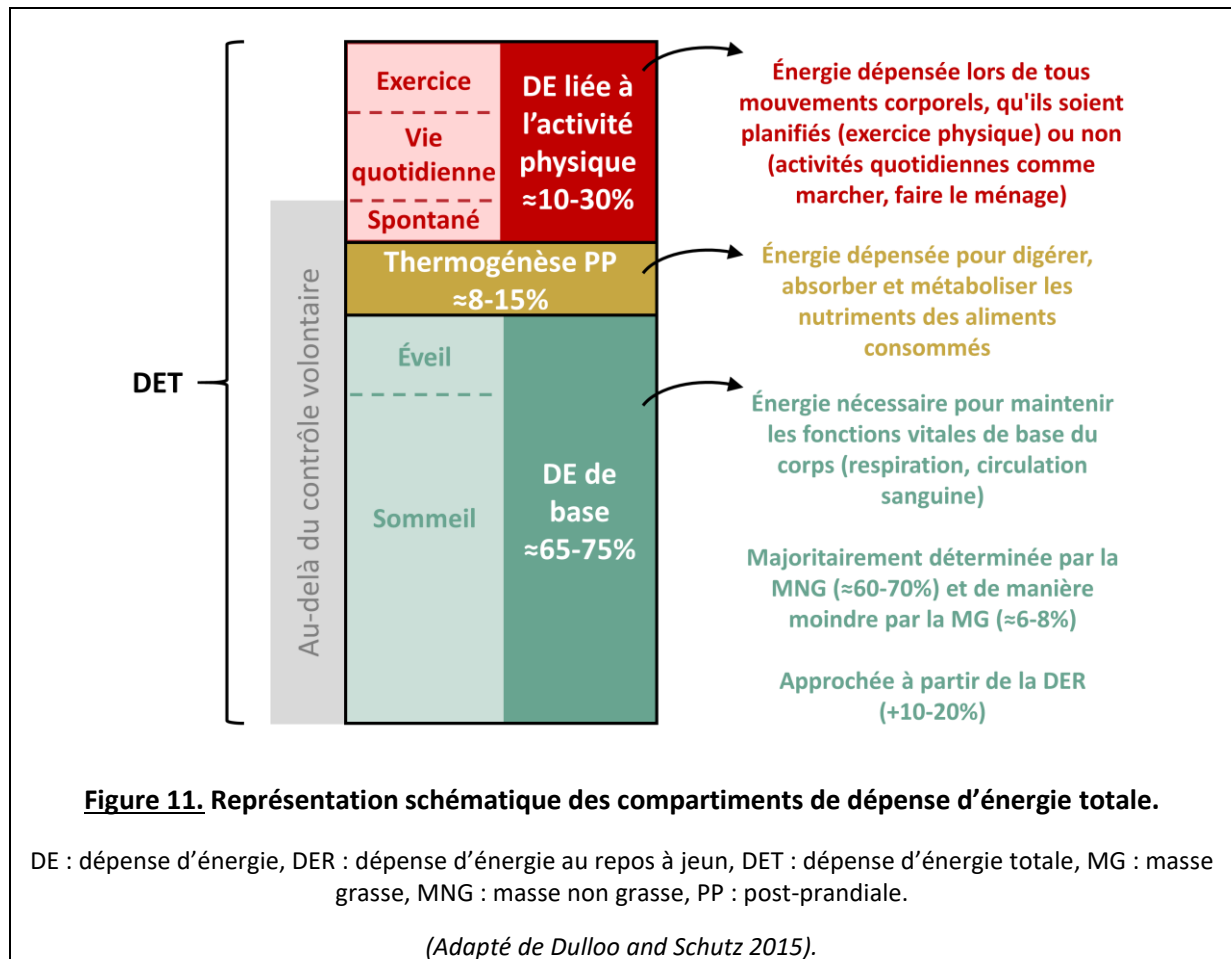
POINTS CLÉS

- La **restriction calorique** est associée à une **augmentation de l'appétit et des signaux orexigènes** issus du système de régulation homéostatique, favorisant la prise alimentaire.
- Un **haut niveau d'activité physique**, associé à un maintien de la MNG, au cours de la perte et de la reprise de poids contribuerait à une meilleure régulation de l'appétit (*via* une meilleure perception de la satiété) et du contrôle cognitivo-hédonique de la prise alimentaire.
- Théoriquement, le phénomène d'hyperphagie pourrait être atténué chez les athlètes par **l'association de la restriction calorique à leur haut niveau d'activité physique**, limitant ainsi l'apparition d'un « *fat overshoot* » à court et moyen terme.
- À l'arrêt de leur carrière sportive, les athlètes présentent **une prévalence des troubles du comportement alimentaire** plus élevée que la population générale, augmentant les risques d'un « *fat overshoot* ».
- L'impact du « **weight cycling** » sur les réponses nutritionnelles des athlètes, en particulier sur le système cognitivo-hédonique, **n'a pas encore été exploré**, mais pourrait dépendre des méthodes de perte de poids employées.

III. Adaptations métaboliques à la perte et reprise de poids chez les athlètes

Constamment modulée par l'organisme pour maintenir l'homéostasie de la balance énergétique, la DET est composée de trois principaux compartiments (Casanova et al. 2019) (**Figure 11**). Le métabolisme de base correspond à la dépense d'énergie minimale nécessaire au maintien des fonctions vitales de l'organisme (respiration, circulation sanguine, *etc.*) et représente 65% à 75% de la DET. Ce dernier étant difficilement mesurable *in vivo*, la mesure de la DER à jeun, par calorimétrie indirecte, permet de s'en approcher avec une valeur légèrement supérieure (+10% à 20%) (Fullmer et al. 2015). La thermogénèse post-prandiale (8% à 15% de la DET) correspond à l'énergie dépensée en plus du métabolisme de base pour digérer, absorber et métaboliser les nutriments des aliments consommés. Elle peut être estimée par mesure de la dépense d'énergie au repos en condition post-prandiale (DEPP). Enfin, la dépense d'énergie liée à l'activité physique représente 10% à 30% de la DET

et regroupe la dépense d'énergie à l'exercice (DEE), lors des activités de la vie quotidienne, ainsi qu'à tout autre mouvement corporel spontané.



À notre connaissance, les études ayant mesuré la DEPP dans un contexte de perte et de reprise de poids sont rares dans la population générale, et d'autant plus chez les athlètes. Chez ces derniers, la perte de poids est en grande partie induite par augmentation du niveau d'activité physique et une restriction calorique, incluant souvent une période de jeûne et de déshydratation sur les dernières heures afin d'atteindre leur poids cible (**Partie I.3.1**). Qu'elle soit calibrée, standardisée ou *ad libitum*, toute prise alimentaire compromettrait cette restriction calorique drastique et entraînerait une reprise de poids rapide. Il est ainsi difficile d'envisager une mesure de la DEPP à la suite d'un repas calibré en laboratoire, car elle ne refléterait pas les conditions de restriction calorique de la perte de poids. Cela a notamment été illustré dans l'étude de Sagayama et al., dans laquelle des boxeurs ont réalisé une perte de poids rapide de 6% en 7 jours en utilisant leurs méthodes habituelles (-60% des apports énergétiques, augmentation de l'activité physique et déshydratation). L'ingestion d'un repas fixe

(1 195 ± 70 kcal) à l'issue de la perte de poids a engendré une reprise de poids d'environ 2%. Les auteurs ont ainsi considéré la mesure de la DEPP de fin de perte de poids comme une période de « récupération » rapide (Sagayama et al. 2019). De ce fait, étudier le métabolisme post-prandial en condition de perte de poids chez les athlètes semble difficile. Les prochaines parties seront ainsi majoritairement dédiées aux adaptations de la DER et DEE en réponse au « *weight cycling* ».

III.1 Modifications du métabolisme de repos en réponse à la perte et reprise de poids

III.1.1 Perte de poids et mise en évidence d'un métabolisme « économe » chez les individus non-athlètes

Diminution de la dépense d'énergie au repos à jeun comme reflet d'un métabolisme « économe »

En tant que principal compartiment de la DET (65% à 75%), une moindre modification du métabolisme de base impacte l'équilibre homéostatique de la balance énergétique. Une réduction de la DER est communément observée à l'issue d'une perte de poids induite par restriction calorique chez des individus normo-pondérés, en situation de surpoids ou d'obésité (Dulloo and Jacquet 1998; Kajioka et al. 2002; Major et al. 2007; Martin et al. 2007; Schwartz and Doucet 2010; Tremblay et al. 2013). Dans l'étude princeps du Minnesota, une diminution significative de la DER a été observée à la fin de la période de semi-famine que ce soit en valeur absolue (1 608 kcal.jour⁻¹ en période contrôle et 994 kcal.jour⁻¹ à la fin de semi-famine, soit une réduction de 39%) comme relative au poids (réduction de 19,5%) ou à la MNG (réduction de 15,5%) (Dulloo and Jacquet 1998; Müller and Bosy-Westphal 2013). Similairement, Müller et al. ont imposé une période de suralimentation (1 semaine, +50% des besoins énergétiques) à 32 hommes normo-pondérés, suivie d'une période de semi-famine (3 semaines, -50% des besoins énergétiques), avant de réaliser de nouveau 2 semaines de réalimentation (+50% des besoins énergétiques). À l'issue de la semi-famine, une perte de poids de 7,5% et une réduction de la DER absolue (-266 kcal.jour⁻¹) et ajustée aux modifications de MNG et MG (-108 kcal.jour⁻¹) ont été observées (Müller et al. 2015).

Ainsi, cette réduction de la DER serait à 65% d'origine « passive », en lien avec une perte des tissus métaboliquement actifs, et à 35% d'origine « active », c'est-à-dire indépendamment des changements de la composition corporelle, reflétant un métabolisme dit « économe » (Dulloo and Schutz 2015). D'après Dulloo & Jacquet, cette réduction de la DER, ne pouvant être expliquée en

totalité par les variations de la composition corporelle, refléterait une « thermogénèse adaptative » (TA) (Dulloo and Jacquet 1998). Bien que sa définition soit sujette à controverse, la TA correspond, dans un contexte de perte de poids, à une réduction de la DER ajustée aux changements de la composition corporelle mesurée plus importante que celle prédite à partir de modèles de régression préalablement établis pour la population étudiée (Müller and Bosy-Westphal 2013).

Les mécanismes sous-jacents au métabolisme « économe »

Principalement mis en évidence dans le cadre d'études portant sur une perte de poids induite par une restriction énergétique sévère chez des personnes en situation de surpoids ou d'obésité (Müller and Bosy-Westphal 2013; Nunes et al. 2022b), les mécanismes impliqués à différentes échelles dans ce métabolisme « économe » incluent : i) une modification de la composition de la MNG (c'est-à-dire une variation de la proportion d'organes à taux métabolique élevé (muscles squelettiques, reins, foie) et du niveau d'hydratation des tissus), ii) une modification de l'activité du système nerveux autonome (SNA) *via* une diminution du tonus sympathique et une augmentation du tonus parasympathique, se traduisant par une réduction de la fréquence cardiaque et de la pression artérielle (Rosenbaum et al. 2000; Müller et al. 2015), iii) un ralentissement des processus métaboliques coûteux en énergie, par exemple une altération de l'oxydation des acides gras libres dans les myocytes, une diminution de l'activité mitochondriale dans le tissu adipeux brun ou encore une réduction de la lipogénèse (Dulloo et al. 2004; Müller and Bosy-Westphal 2013), iv) une meilleure efficacité mitochondriale, c'est-à-dire une maximisation de la production d'adénosine triphosphate à partir des substrats énergétiques disponibles (Müller and Bosy-Westphal 2013; Most and Redman 2020), et v) une réduction des hormones circulantes telles que les hormones thyroïdiennes (triiodothyronine (T3) et thyroxine (T4)), la leptine et l'insuline (Rosenbaum and Leibel 2010; Müller and Bosy-Westphal 2013; Nunes et al. 2022b).

L'insuline est une hormone hypoglycémisante et anti-lipolytique, dont l'association avec la TA au cours d'un épisode de variation de poids a été suggérée par Müller et al. (2016). Ainsi, après la déplétion des réserves de glycogène hépatique et musculaire observée lors de la phase précoce de perte de poids (*i.e.*, jusqu'à un mois) (Heymsfield et al. 2011), la diminution des concentrations d'insuline en réponse à la restriction énergétique pourrait participer à la réduction de la DER (*via* une réduction de l'activité du SNS et de l'axe thyroïdien) et à une utilisation préférentielle des lipides (Bosy-Westphal et al. 2009; Müller et al. 2016).

La leptine possède un rôle central dans l'homéostasie énergétique par son implication dans la régulation des apports (voir **Partie II.2**) et de la dépense d'énergie (Rosenbaum and Leibel 2010). Sécrétée par les adipocytes du tissu adipeux blanc, cette adipokine reflète l'état des réserves d'énergie au niveau de l'hypothalamus et semble impliquée dans l'activation des mécanismes d'économie d'énergie lors d'une perte de poids (Rosenbaum and Foster 2023). En réponse à une restriction calorique, une réduction marquée de la leptine semble systématiquement observée, indépendamment de la durée de la restriction calorique, et serait probablement liée à une diminution de la MG (Bosy-Westphal et al. 2009; Lecoultre et al. 2011; Müller et al. 2015; Redman et al. 2018). Par ailleurs, la leptine a également un rôle spécifique dans le métabolisme énergétique, notamment en stimulant la lipolyse et en favorisant l'utilisation des acides gras libres pour la production d'énergie (Hwa et al. 1997; Pereira et al. 2020). Suite à une perte de poids, plusieurs études ont observé une augmentation de l'activité lipolytique au sein du tissu adipeux et de l'oxydation des lipides au repos. Par exemple, Heyman et al. ont induit une restriction calorique (-806 ± 162 kcal.jour⁻¹, 21 jours) chez 7 hommes normo-pondérés, ayant conduit à une perte de poids de 1,8 kg environ. Une réduction de la DER (-100 ± 29 kcal.jour⁻¹) et une diminution du quotient respiratoire (QR) sur 24 heures (-4% à -5%), indiquant une proportion plus élevée de lipides oxydés, ont été observés en réponse à la perte de poids (Heyman et al. 1992). De même, un QR au repos diminué de 15% a été observé dans les travaux de Müller et al. précédemment décrits, accompagné d'une réduction significative de l'activité du système nerveux sympathique (SNS) et des niveaux plasmatiques de leptine et de T3 à l'issue des 3 semaines de semi-famine (Müller et al. 2015).

La modulation du SNA pourrait expliquer une part importante de l'état « hypo-métabolique » par des effets directs sur les muscles squelettiques ou indirects *via* une réduction de la concentration circulante des hormones thyroïdiennes (Flier et al. 2000; Rosenbaum et al. 2000). Cette réduction pourrait contribuer à une épargne protéique dans les muscles squelettiques (Gardner et al. 1979), à une réduction de la DER *via* l'action de la T3 sur la réduction de la consommation d'oxygène par les myocytes et les cellules hépatiques (Müller and Seitz 1981) et à une diminution de la production de chaleur par son action sur l'activité du tissu adipeux brun (Silvestri et al. 2005). De plus, une réduction de la température corporelle a été mesurée chez les volontaires de l'étude du Minnesota au cours de leur perte de poids (Kalm and Semba 2005). Chez les adultes, la thermorégulation (c'est-à-dire le maintien de la température corporelle sous le contrôle de l'hypothalamus) représente environ 40% de la DET (Landsberg 2012). Particulièrement démontré chez les animaux homéothermes, une baisse de température pourrait ainsi refléter ce métabolisme ralenti, dit « économe », en réponse à une perte de poids induite par restriction calorique (Calonne et al. 2019).

Importance de la nature du déficit énergétique : restriction calorique et/ou exercice

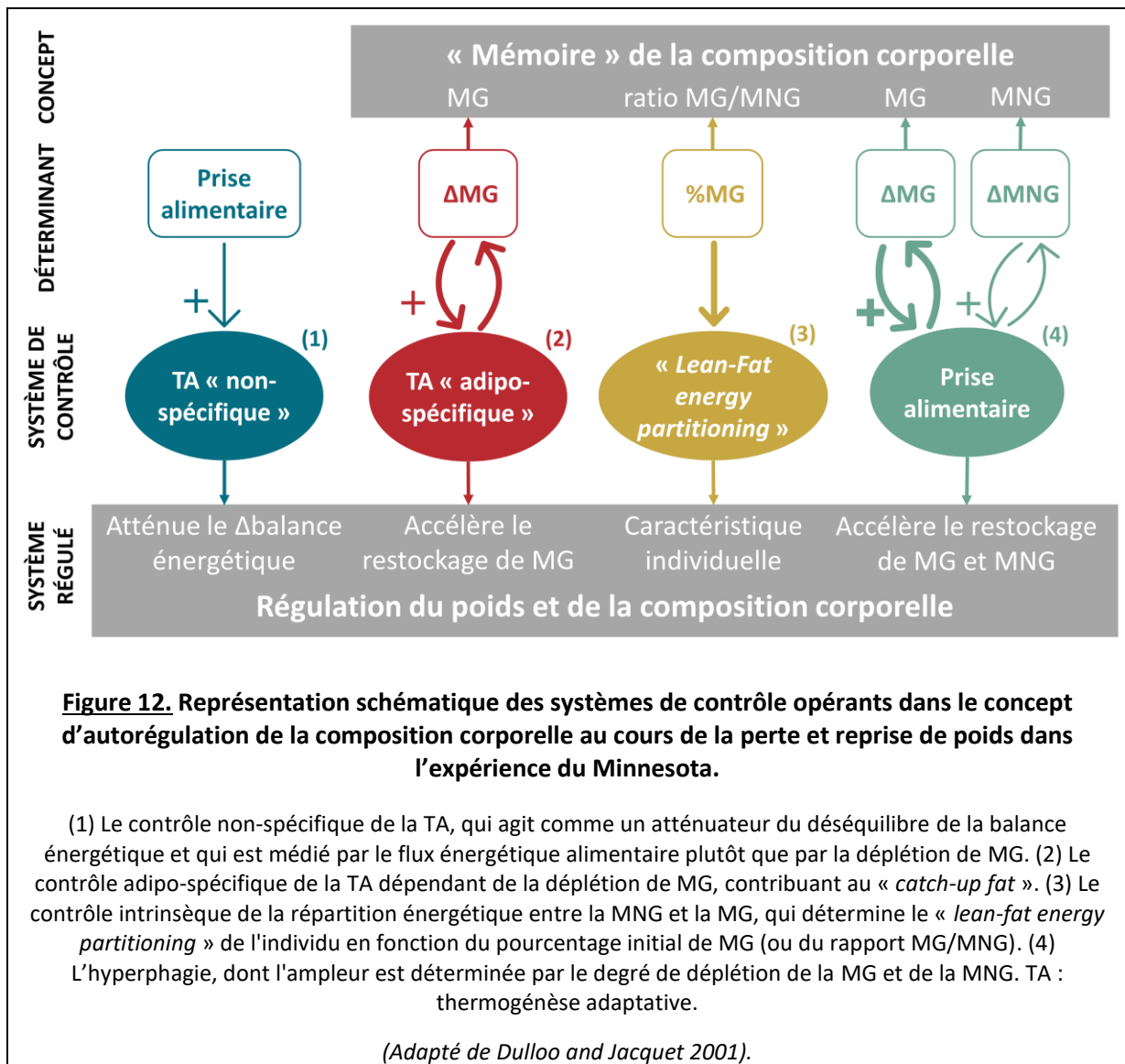
Comme l'ont souligné Nunes et al. (2022) dans leur analyse systématique, il est important de considérer la nature du déficit énergétique, notamment la composition en macronutriments des repas dans le cadre d'une intervention diététique, le degré de restriction énergétique et le niveau d'activité physique (Nunes et al. 2022b). En effet, les études ayant induit une perte de poids par l'exercice seul (déficit énergétique d'environ $-250 \text{ kcal.jour}^{-1}$) n'ont pas observé de réduction de la DER ou du QR chez des individus normo-pondérés, en situation de surpoids ou d'obésité (Mourier et al. 1997; Lee et al. 2009; Jennings et al. 2009; Hopkins et al. 2014; Karstoft et al. 2017). Ainsi, les adaptations observées dans les études susmentionnées seraient davantage liées au degré de restriction des apports énergétiques qu'au niveau de déficit de la balance énergétique (Most and Redman 2020).

Cependant, dans leur étude, Koehler et al. (2017) ont imposé une perte de poids de 3 mois à des femmes sédentaires normo-pondérées, soit par restriction calorique combinée à un programme d'activité physique de type aérobie (-30% des apports énergétiques, $+30\%$ de la dépense d'énergie ; $n = 8$), soit par exercice seul ($+30\%$ de la dépense d'énergie, $n = 8$). À l'issue de la perte de poids ($-3,7 \pm 0,9 \text{ kg}$ et $-2,7 \pm 0,8 \text{ kg}$, respectivement) associée à un maintien de la MNG, aucune modification de la DER absolue ou ajustée à la MNG n'a été observée dans le premier groupe, tandis qu'une réduction de 6% a été observée dans le second (Koehler et al. 2017). En raison de la variabilité inter-individuelle dans les réponses métaboliques du premier groupe, les analyses ont été réalisées en deux sous-groupes. Il a ainsi été révélé que les 4 femmes ayant présenté une réduction significative de la DER ($-188 \pm 69 \text{ kcal.jour}^{-1}$) correspondaient à celles ayant perdu le plus de poids ($-5,8 \pm 1,0 \text{ kg}$) et de MG ($-4,2 \pm 1,1 \text{ kg}$), ainsi une réduction de 57% des taux de leptine par rapport à la condition contrôle. À l'inverse, les 4 femmes n'ayant pas eu une DER réduite ($+219 \pm 67 \text{ kcal.jour}^{-1}$) étaient celles ayant perdu le moins de poids ($-1,9 \pm 0,8 \text{ kg}$) et de MG ($-1,3 \pm 0,6 \text{ kg}$), sans modification significative de leur taux de leptine ($+4,4 \pm 17,5\%$). Bien que le nombre de sujets constitue une limite méthodologique, ces résultats soulignent l'importance du degré de perte de poids et de MG, ainsi que le rôle de l'activité physique et son interaction avec la restriction calorique dans l'observation de telles adaptations métaboliques.

Persistance du métabolisme « économe » au cours de la reprise de poids

Dans l'étude de Kajioaka et al. (présentée en **Partie I.2**), une réduction de la DER ainsi que des concentrations des hormones thyroïdiennes (T3 et T4) a été observée dès la fin de la première période

de restriction calorique (Kajioka et al. 2002). Cette diminution aurait persisté jusqu'à 6 mois après l'arrêt de la restriction calorique. De même, chez les volontaires de l'étude du Minnesota, la TA a perduré au cours de la réalimentation, reflétant une économie d'énergie de 10% à 15% de la DER, consacrée à la reconstitution des réserves lipidiques et favorisant ainsi une augmentation de la MG (Dulloo et al. 1996). Une association positive a été mise en évidence entre la TA et le degré de perte et de reprise de MG, mais non de MNG (Dulloo et al. 1996). Le degré de la déplétion en MG agirait comme une boucle de rétroaction positive sur la thermogénèse (**Figure 12**) *via* les concentrations plasmatiques en leptine, appelé le contrôle adipo-spécifique de la TA (Dulloo and Jacquet 2001). Ce contrôle s'oppose au contrôle dit « non-spécifique » de la TA, agissant rapidement en réponse aux modifications du flux énergétique *via* le SNS et de sécrétions hormonales (leptine, insuline, hormones thyroïdiennes) (Dulloo and Jacquet 2001; Rosenbaum and Leibel 2010). De ce fait, pendant la reprise de poids, le contrôle non-spécifique supprimerait rapidement la TA *via* l'augmentation des apports énergétiques, tandis que le contrôle adipo-spécifique serait lentement dissipé par rétroaction de la restauration des réserves adipeuses (Dulloo and Jacquet 1998). De plus, l'augmentation des taux d'insuline avec la réalimentation entraîne une absorption du glucose au niveau des cellules musculaires squelettiques, dans lesquelles la TA est toujours effective (Dulloo et al. 2006). Le glucose ainsi accumulé au niveau musculaire est détourné par l'insuline vers la lipogenèse et le stockage des lipides dans le tissu adipeux, contribuant également à une prise de MG compensatoire. Ce mécanisme adaptatif, bien que destiné à restaurer rapidement les réserves énergétiques et à maintenir une glycémie stable, augmente le risque d'insulino-résistance au cours de la reprise de poids (Dulloo et al. 2006). Ainsi, associé au mécanisme « *lean-fat energy partitioning* », ce double contrôle de la TA contribuerait à une désynchronisation de la restauration de la MG et de la MNG, et serait à l'origine du « *catch-up fat* » observé (Dulloo 2021). Enfin, les mécanismes de conservation d'énergie amélioreraient l'efficacité métabolique, accélérant le stockage lipidique et favorisant l'apparition d'un « *fat overshoot* ». Toutefois, dans leur étude revisitée du Minnesota précédemment mentionnée, Müller et al. ont observé une absence de modification de la sensibilité à l'insuline au cours de l'épisode de variation de poids, ainsi qu'une suppression de la TA à l'issue de la reprise de poids après les deux semaines de réalimentation, sans observation de « *catch-up fat* » (Müller et al. 2015). De ce fait, un seuil de déplétion de MG pourrait être impliqué dans l'activation des mécanismes de la TA adipo-spécifique (Minnesota : -60% de la MG initiale *versus* étude revisitée du Minnesota : -18% de la MG initiale). En effet, Dulloo et al. suggèrent que le phénomène de « *catch-up fat* » ne serait observé que pour des pertes de poids entraînant une déplétion de plus d'un tiers de la MG initiale (Dulloo et al. 2018).



III.1.2 Adaptations métaboliques à la perte de poids chez les athlètes

Le maintien de la masse non grasse comme facteur limitant la réduction de la dépense d'énergie au repos

Au cours de leur perte de poids (**Partie I.3.1**), les athlètes combinent une restriction énergétique avec un maintien ou une augmentation de l'activité physique. Le maintien de MNG et la perte de MG recherchés par les athlètes pourraient théoriquement limiter les adaptations métaboliques et leur persistance en phase de reprise de poids observées chez les individus normo-pondérés (Trexler et al. 2014).

Dans le cadre d'une étude de cas menée par Langan et al., un athlète de taekwondo a été suivi pendant d'une période de perte de poids progressive de 7 semaines (1 700 kcal.jour⁻¹), suivie d'une perte de poids rapide de 5 jours (1 200 kcal.jour⁻¹) puis d'une période d'alimentation *ad libitum* de 5 jours (Langan-Evans et al. 2021). À l'issue de la perte de poids de 13% (soit 6,2 kg, dont 4,4 kg de MG), une réduction de la DER absolue (-149 kcal.jour⁻¹) a été observée, avec un ratio entre la DER mesurée et prédite passant de 0,94 à 0,87, indiquant l'existence d'une TA dès la troisième semaine de perte de poids (TA de -36 kcal.jour⁻¹ après 3 semaines de perte de poids, et de -213 kcal.jour⁻¹ la veille de la compétition). Une semaine après l'arrêt du régime, une hyperphagie a été observée au cours de la période *ad libitum*, induisant une reprise de poids rapide de 8,3 kg, accompagnée d'un retour de la MNG à sa valeur initiale sans modification de la MG, ainsi qu'une DER supérieure à ses valeurs initiale (+20%) et prédite (+18%) (Langan-Evans et al. 2021).

Plusieurs études concernant des athlètes de force (culturisme et musculation), tant masculins que féminins, ont également observé une diminution significative de la DER, variant de 150 kcal.jour⁻¹ à 900 kcal.jour⁻¹, après une perte de poids progressive d'au moins 10% sur 20 semaines. Cette perte de poids a été associée à une diminution significative de la MG (-50% à -70%), mais à une variation moindre de la MNG (-4% à +1%) (Rossow et al. 2013; Robinson et al. 2016; Hulmi et al. 2017; Pardue et al. 2017; Isola et al. 2023). Cette réduction de la DER s'accompagnait d'une altération de l'activité du SNA, avec une diminution significative de la fréquence cardiaque au repos, une altération de la fonction thyroïdienne illustrée par une baisse des concentrations plasmatiques de T3 et T4, ainsi qu'une réduction des taux de leptine et d'insuline au cours de la perte de poids (Rossow et al. 2013; Hulmi et al. 2017; Pardue et al. 2017; Isola et al. 2023). Une mobilisation et utilisation augmentée des lipides et réduite des glucides au repos en période de perte de poids a également été observée (Rossow et al. 2013; Isola et al. 2023). Selon les paramètres mesurés, ces modifications métaboliques semblent se dissiper progressivement au cours de la reprise de poids, sans observation de « *fat overshoot* » (Rossow et al. 2013; Hulmi et al. 2017; Pardue et al. 2017; Isola et al. 2023). Dans l'étude d'Isola et al., 13 culturistes féminins et masculins ont réalisé une perte de poids de 14% (+2% MNG chez les femmes et -4% MNG chez les hommes, -70% MG chez les hommes comme les femmes) en 23 semaines pour leur compétition. Une TA de -150 kcal et de -300 kcal, respectivement, a été observée (Isola et al. 2023). Cette adaptation serait expliquée par le faible taux de MG des athlètes à l'issue de leur perte de poids (5,6 ± 0,2% chez les hommes et 12,6 ± 6,0% chez les femmes), proche des limites des normes de santé (c'est-à-dire 2% à 5% chez les hommes et 10% à 13% chez les femmes) (Friedl et al. 1994; Jeukendrup and Gleeson 2010). Les concentrations plasmatiques de leptine ont été davantage réduites chez les femmes en raison de leur MG initiale plus élevée que les hommes. Vingt-trois semaines après la compétition, un retour du poids et des concentrations plasmatiques de T3, de

T4 et de leptine à leurs valeurs initiales a été observé. De plus, tandis qu'aucun « *weight* ou *fat overshoot* » n'ait été rapporté, une suppression de la TA a été notée chez les hommes (+50 kcal) mais pas chez les femmes (-200 kcal), ce qui pourrait favoriser une reprise de poids sur le plus long terme chez les athlètes féminines. Bien que le nombre de femmes en reprise de poids considérées dans cette étude soit faible (n = 4), ce résultat suggère un dimorphisme sexuel qui mérite des études supplémentaires. En effet, un dimorphisme sexuel dans les adaptations énergétiques en réponse à une perte de poids a précédemment été observée chez des individus en situation d'obésité. En effet, Doucet et al. ont suivi 40 participants (16 hommes, 24 femmes) ayant réalisé une intervention de restriction calorique (-700 kcal.jour⁻¹) de 15 semaines. A l'issue de la perte de poids, la DER a été réduite uniquement chez les hommes (-11% du poids de corps) et était associée à une diminution de l'oxydation des lipides, tandis qu'aucune modification n'a été observée chez les femmes (-9% du poids de corps) (Doucet et al. 2000). Les auteurs ont émis l'hypothèse de l'existence d'un seuil minimal plus faible des concentrations plasmatiques de leptine chez les femmes, afin que les mécanismes sous-jacents engendrant des adaptations énergétiques s'opèrent. Des résultats supplémentaires publiés en 2001 ont également mis en évidence qu'une TA a été mesurée en phase dynamique de perte de poids (semaine 8) chez l'ensemble des participants. Toutefois, 2 à 4 semaines post-intervention (semaines 17 à 19), la TA avait diminué de manière plus importante chez les femmes, tandis qu'elle persistait chez les hommes (Doucet et al. 2001). De plus, la TA avait été davantage atténuée chez les femmes ayant maintenu leur poids perdu. Ainsi, au-delà de l'effet sexe mis en évidence, ces observations suggèrent que la TA tend à disparaître lorsque la balance énergétique est proche de l'équilibre, en accord avec la revue systématique de Nunes et al. (2022b).

Dans l'étude de Sagayama et al., 7 boxeurs ont réalisé une perte de poids rapide de 6% en 7 jours en employant leurs méthodes habituelles (-60% des apports énergétiques, augmentation de l'activité physique et déshydratation) (Sagayama et al. 2019). Selon une estimation de la composition corporelle à l'aide de la formule des trois compartiments de Siri (basée sur la densité corporelle mesurée par pesée hydrostatique et le volume d'eau corporel total estimé par méthode de dilution) (Siri 1993), cette perte serait expliquée à 50,6% par la perte en eau, à 33,8% par la perte en MG et à 15,6% par la réduction de la MNG sèche (glycogène, minéraux, protéines). À l'issue de la perte de poids, une diminution significative de la DER absolue (-0,19 kcal.min⁻¹), mesurée dans une chambre calorimétrique pendant 7 heures de sommeil, a été observée. Toutefois, les données de dépense énergétique n'ont pas été rapportées sur la composition corporelle, ce qui n'a pas permis de déterminer si cette réduction est passive (liée à la perte de tissus actifs) ou active. L'ingestion d'un repas (1 195 ± 70 kcal ; 16% de protéines, 22% de lipides et 61% de glucides) a marqué l'arrêt de la période de perte de poids et a entraîné une reprise de poids d'environ 2%. La mesure de la dépense

d'énergie dans les 3 heures suivant cette reprise de poids a montré une DEPP absolue réduite par rapport à celle mesurée dans les mêmes conditions avant régime. De plus, une réduction du QR, indiquant une réduction de l'oxydation des glucides et une augmentation de celle des lipides, a été observée par rapport à la période initiale, tant à l'issue de la perte de poids (à jeun) comme en reprise de poids (post-prandial). Selon les auteurs, ces observations seraient principalement dues à la réduction de la consommation en glucides au cours de la perte de poids et reflèteraient l'état de déplétion des stocks en glycogène (Sagayama et al. 2019). Ainsi, une reprise de poids très rapide de 3 heures, comme cela pourrait se produire dans un contexte de compétition dans certains sports à catégorie de poids, ne permettrait pas de rétablir le métabolisme initial. Associées au phénomène d'hyperphagie (**Partie II.1**) (Heyman et al. 1992; Roberts et al. 1994), ces adaptations pourraient favoriser une reprise de poids et de MG.

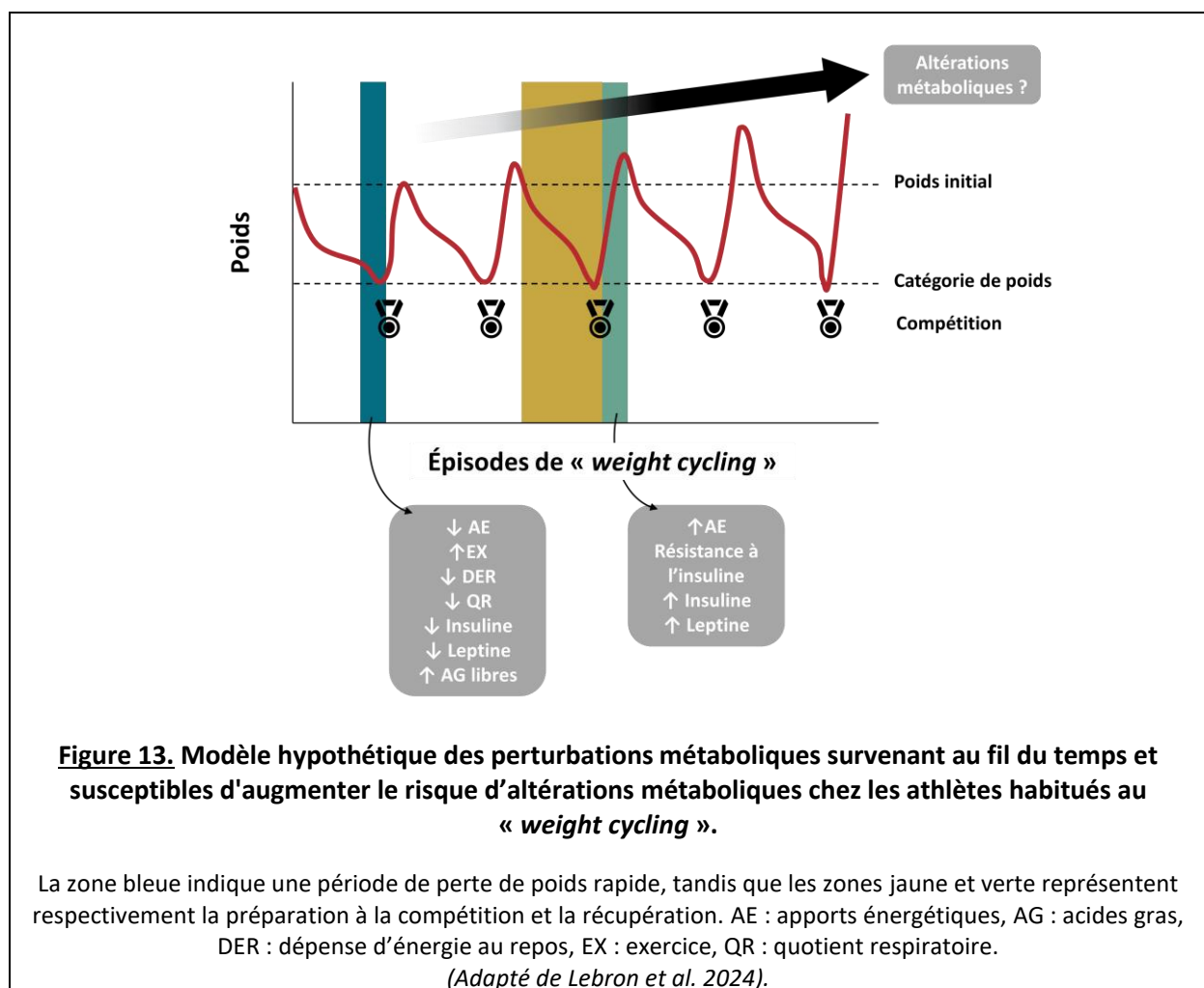
En revanche, Conlin et al. n'ont observé aucune modification de la DER absolue à l'issue d'une perte de poids d'environ 4,2%, induite par une restriction énergétique d'environ 19% et un programme d'entraînement physique sur 10 semaines chez des culturistes masculins et féminins (Conlin et al. 2021). Cette observation serait en grande partie expliquée par le maintien de MNG parallèlement à une diminution de 15,5% de la MG. À l'issue de la reprise de poids progressive sur 10 semaines, aucun « *weight* ou *fat overshoot* » n'a été observé et le pourcentage de MG était resté significativement inférieur à la valeur initiale. Bien que les observations réalisées lors de pertes et de reprises de poids modérées pourraient laisser penser à une absence d'adaptations métaboliques, le nombre limité d'études mesurant les paramètres d'oxydation des substrats et les paramètres biologiques au cours d'épisodes de « *weight cycling* » chez les athlètes empêche de tirer des conclusions définitives sur les réelles conséquences de telles pratiques sur le métabolisme énergétique.

Altérations métaboliques sur le long terme

À ce jour, la plupart des effets à long terme de la répétition de cycles de perte et de reprise de poids sur le métabolisme énergétique et l'état de santé ont été étudiés chez les personnes en situation de surpoids ou d'obésité, tandis que les recherches menées chez les athlètes sont limitées (Lebron et al. 2024). Si les adaptations métaboliques semblent transitoires lors de la perte de poids et restaurés après la reprise de poids, les athlètes habitués au « *weight cycling* » pourraient présenter une DER plus basse que ceux n'en réalisant pas, suggérant un effet des variations de poids répétées sur le métabolisme énergétique sur le long terme. En effet, Steen et al. ont observé que des lutteurs habitués à réaliser des pertes de poids hebdomadaires d'au moins 4,5 kg présentaient une DER significativement réduite par rapport à des lutteurs n'en réalisant pas, tout en ayant un poids similaire (1 585 kcal.jour⁻¹

versus 1 841 kcal.jour⁻¹, respectivement) (Steen 1988). Cependant, aucune différence du QR ou de la fréquence cardiaque au repos n'a été observée. À l'inverse, d'autres études n'ont pas rapporté de différences significative de la DER, ou encore des concentrations plasmatiques de T3 et de T4 libres ou d'insuline entre deux groupes d'athlètes habitués ou non au « *weight cycling* » (au moins 3 kg de perte de poids par cycle, 3 à 6 fois par saison) (Brewer 1992; McCargar and Crawford 1992). Bien qu'une baisse des concentrations plasmatiques de T3 ait été observée à la fin de la saison sportive chez les athlètes habitués au « *weight cycling* » dans l'étude de Brewer (1992), celle-ci ne semblerait pas suffisante pour entraîner une modification de la DER et ne paraît pas liée aux épisodes de perte et reprise de poids.

Toutefois, bien que le manque d'études dans ce domaine ne permet pas aujourd'hui de fournir de preuves robustes, les altérations observées pourraient indiquer une prédisposition au surpoids et à l'obésité ainsi qu'aux troubles cardio-métaboliques associés sur le long terme (Zhang et al. 2005; Saarni et al. 2006; Marquet et al. 2013) (**Figure 13**).



III.2 Modifications du métabolisme à l'exercice en réponse à une perte et reprise de poids

Bien qu'elle représente 10% à 30% de la DET, la DEE semble très peu mesurée en fonction des variations de poids chez des individus normo-pondérés et encore moins chez les athlètes. En effet, les études menées sur les athlètes pratiquant le « *weight cycling* » se concentrent principalement sur l'influence des variations de poids sur les performances physiques (succès lors de compétitions, force maximale, capacités aérobie maximale, endurance maximale, etc.). Pourtant, la contribution de la DEE à la DET est particulièrement élevée chez les athlètes, ce qui souligne l'importance de la prendre en considération (Poehlman et al. 2002; Westerterp 2013).

Dans leur étude longitudinale, McMurray et al. ont mesuré la DEE lors d'un exercice de 8 minutes sur tapis roulant à 85% de la $\dot{V}O_{2max}$ chez 20 lutteurs ayant suivi un régime hypocalorique (22 kcal.kg MNG⁻¹.jour⁻¹) durant 7 jours, répartis en deux groupes : contrôle (50% de glucides, 30% lipides et 20% protéines) ou à haute teneur en glucides (70% glucides, 15% lipides et 10% protéines) (McMurray et al. 1991). À l'issue de la restriction calorique, après une perte de poids de $2,4 \pm 0,2$ kg (environ -3,2% du poids et -18,5% de la MG), aucune modification de la DEE à jeun ni de la fréquence cardiaque n'a été observée, que ce soit entre les deux groupes qu'entre les conditions pré- et post-régime (McMurray et al. 1991). En revanche, une augmentation de l'utilisation des lipides et une diminution concomitante de celle des glucides ont été rapportées dans les deux groupes à la suite de la perte de poids.

Dans l'étude précédemment mentionnée de Sagayama et al., les 7 boxeurs ont réalisé un exercice incrémental sur tapis roulant à trois intensités différentes (5 minutes par palier) : faible (75% du second seuil lactique), modérée (100% du second seuil lactique) et haute (125% du second seuil lactique). Indépendamment de l'intensité d'exercice, les résultats comparant les données avant régime et après 3 heures de reprise de poids rapide ont montré une diminution de la DEE nette et de l'oxydation des glucides (nette absolue et en proportion) et une augmentation de l'oxydation des lipides (nette absolue et en proportion), sans modification de la fréquence cardiaque. Après ajustement sur le poids, seule l'oxydation des substrats restait significativement différente. Toutefois, le coût énergétique de l'exercice ne différait pas entre les conditions. À l'inverse, chez des personnes en situation d'obésité, Nicklas et al. ont observé une diminution de l'oxydation des lipides à l'exercice avec la perte de poids, qui, selon van Aggel-Leijssen et al., pourrait être prévenue par la réalisation d'exercices de faible intensité. Ainsi, Sagayama et al. ont suggéré que l'entraînement quotidien des athlètes pourrait expliquer cette différence (Sagayama et al. 2019). Cependant, aucune autre mesure

n'a été réalisée *a posteriori*, ce qui ne permet pas d'identifier la persistance de cette adaptation au cours de la récupération complète du poids.

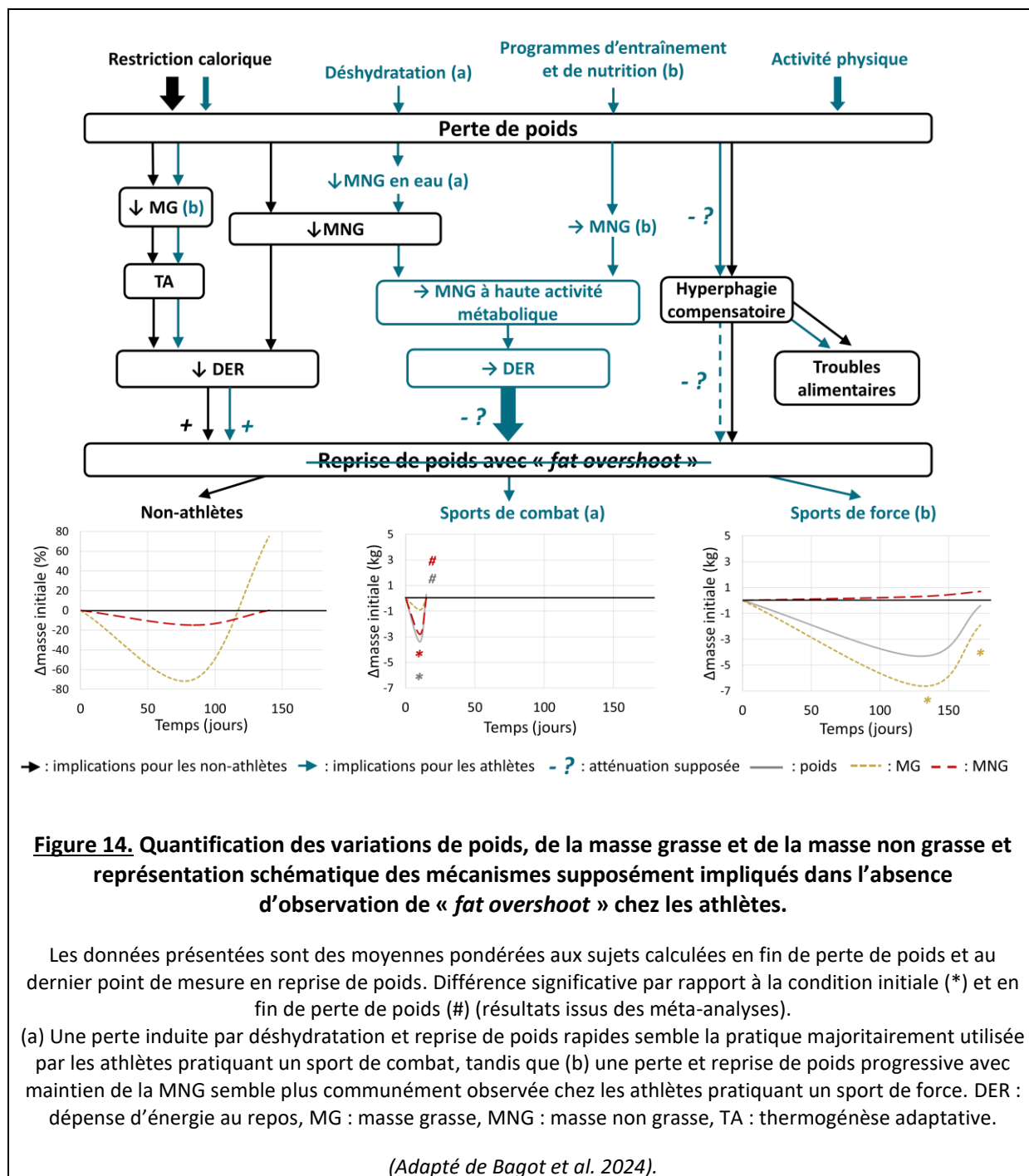
Il semblerait qu'aucune étude n'ait mesuré la DEE ou l'oxydation des substrats à l'exercice en réponse à une perte et reprise de poids sur le moyen ou long terme chez les athlètes. Dans l'étude revisitée du Minnesota de Müller et al. chez des individus normo-pondérés, une DEE nette (marche à 1, 2,5 et 5 km.h⁻¹ sans précision sur la durée de l'exercice) réduite a été observée à la fin de la période de restriction énergétique (-50% des apports énergétiques, 21 jours, -7,6% de perte de poids), avant de réaugmenter après 14 jours de réalimentation *ad libitum*. À l'instar des modifications observées en condition de repos, ces résultats suggèrent un effet transitoire de la perte de poids sur les adaptations métaboliques à l'exercice.

Pour évaluer les effets du « *weight cycling* » sur le long terme, Manore et al. ont comparé la DEE lors d'un exercice de marche (4,8 km.h⁻¹ avec une pente de 5%, 10% et 15%, 3 minutes par palier) entre des femmes habituées aux régimes (au moins quatre périodes de plus de 7 jours avec des apports caloriques inférieurs à 1 000 kcal.jour⁻¹ sur l'année précédente) et des femmes n'en réalisant pas. Indépendamment de la pente, le QR et la DEE absolue ne différaient pas entre les groupes, tandis que la DEE relative au poids était inférieure de 5% à 7% chez les femmes habituées aux régimes (Manore et al. 1991). Toutefois, les auteurs ont émis l'hypothèse que cette meilleure efficacité métabolique pourrait être liée à un poids et une MG plus élevés dans ce groupe, suggérant que la pratique du « *weight cycling* » pourrait augmenter l'adiposité, nécessitant moins d'énergie par kilogramme de poids corporel (Manore et al. 1991).

Finalement, des études supplémentaires sur les adaptations métaboliques à l'exercice, avec différentes modalités, chez les athlètes habitués au « *weight cycling* » semblent nécessaires à court, moyen et long terme après la perte de poids.

POINTS CLÉS

- Une perte de poids peut être associée à un métabolisme « économe », caractérisé par une **diminution de la DER** induite par des **adaptations métaboliques sous-jacentes** dépendantes du **degré de perte de poids** et des changements de la **composition corporelle**.
- Associé à une suralimentation, ce **métabolisme « économe » persistant en reprise de poids** peut contribuer au phénomène de « *collateral fattening* ».
- Une **perte de poids et de MG importante**, souvent observée chez les athlètes de force, contribuerait à l'observation d'un métabolisme « économe », progressivement supprimé au cours de la reprise de poids.
- Le **maintien de la MNG** par les athlètes et leur **haut niveau d'activité physique** au cours de la perte et de la reprise de poids, pourrait limiter ce métabolisme « économe » et **réduire les risques de « fat overshoot »** à court et moyen terme (**Figure 14**).
- Les résultats observés chez les athlètes réalisant des **pertes de poids modérées** suggèrent une absence de modification de la DER, mais les adaptations métaboliques sous-jacentes **restent peu étudiées**.
- À long terme, les athlètes habitués au « *weight cycling* » pourraient développer des **altérations métaboliques** augmentant le risque de surpoids ou d'obésité.
- Les adaptations métaboliques à **l'exercice** restent peu explorées chez les athlètes au cours d'un épisode complet de « *weight cycling* ».
- L'**effet du sexe** sur les adaptations métaboliques à la perte de poids n'est pas encore clairement établi.



Comme observé tout au long de ce premier chapitre, peu d'études semblent s'être intéressées aux athlètes féminines dans le cadre de l'étude des adaptations énergétiques au « weight cycling ». En effet, les femmes représentaient uniquement 10% des athlètes inclus dans notre revue systématique à ce sujet (Bagot et al. 2024). Pourtant, certaines études ont observé des différences dans les adaptations métaboliques entre les hommes et les femmes en réponse à une perte et reprise de poids (Doucet et al. 2000; Isola et al. 2023).

Par ailleurs, au-delà des variations de poids, de récentes études et revues soulignent un manque de considération de la femme dans les sciences du sport et de l'exercice physique (Costello et al. 2014; Martínez-Rosales et al. 2021; Paul et al. 2023). Pourtant, en plus des modifications physiologiques induites par leur haut niveau d'activité physique et leurs entraînements, les athlètes féminines possèdent des spécificités hormonales ovariennes pouvant modifier le métabolisme énergétique.

CHAPITRE II

Statut hormonal ovarien
et métabolisme énergétique de l'athlète féminine

I. Le statut hormonal ovarien

La puberté correspond à un ensemble de phénomènes de maturation sous l'influence de l'augmentation des concentrations des hormones gonadiques, entraînant, notamment, un dimorphisme sexuel en termes de composition corporelle et du métabolisme énergétique (Hoyt and Falconi 2015). À partir de cette puberté, la femme présente des variations hormonales physiologiques (cycle menstruel, péri-ménopause, ménopause) pouvant être modifiées tout au long de sa vie (grossesse(s), contraception hormonale, traitement hormonal substitutif, *etc.*), qui vont avoir des implications physiologiques et psychologiques (Rich-Edwards and Morton 2002). Ainsi, chez les athlètes féminines, de nombreuses études questionnent l'influence de ces variations hormonales avec les adaptations physiologiques à l'entraînement, le bien-être physique et mental, et ainsi la performance (Elliott-Sale et al. 2020; McNulty et al. 2020; Hackney 2021; Isacco and Boisseau 2023).

I.1 Les étapes de la vie hormonale de la femme

De la puberté à la ménopause, les femmes présentent des variations hormonales ovariennes et androgènes (Szyba and Montella 2000; Driancourt and Levasseur 2001), sous le contrôle coordonné des systèmes gonadotrope, somatotrope et adipostatique (Isacco et al. 2012a). L'activation de l'axe hypothalamo-hypophyso-gonadique déclenche la puberté, *via* la sécrétion pulsatile de gonadotrophine (GnRH), associée à des modifications physiologiques, dont l'apparition de caractères sexuels secondaires morphologiques (Hoyt and Falconi 2015). L'arrivée des premières menstruations entre 9 et 14 ans, appelée ménarche, signale le début du fonctionnement des capacités reproductrices de la femme (Brito and Latronico 2015). C'est en général au cours des trois années suivant la ménarche que les cycles menstruels deviennent réguliers et ovulatoires (Hosokawa et al. 2012). Ainsi, tout au long de sa vie reproductive, la femme présente des cycles menstruels se caractérisant par des variations hormonales périodiques préparant l'organisme à une éventuelle grossesse. Tout au long de leur vie reproductive, les femmes peuvent utiliser des moyens de contraception non-hormonale (préservatif, dispositif utérin au cuivre, *etc.*) ou hormonale (pilule, implant, patch, anneau vaginal, dispositif intra-utérin, *etc.*) afin de réguler leur fertilité (Teal and Edelman 2021). La péri-ménopause, période de transition de 2 à 8 ans en moyenne (Klein and Soules 1998), constitue la première étape dans le ralentissement des fonctions de reproduction de la femme et se caractérise par des cycles irréguliers ainsi que par des symptômes tels que les bouffées de chaleur ou les troubles du sommeil (Hachul et al. 2023). La ménopause est caractérisée par une aménorrhée de 12 mois consécutifs et

marque l'arrêt permanent de la fonction ovarienne, apparaissant généralement entre 45 et 55 ans (Greendale et al. 1999; Jeong and Park 2022). Le déclin des concentrations des hormones ovariennes est associé à des modifications, notamment, de la composition corporelle (prise de poids, augmentation de la MG viscérale, diminution de la densité minérale osseuse, etc.) et métaboliques (modification des apports et de la dépense d'énergie pouvant conduire à une balance énergétique positive, augmentation des risques cardio-métaboliques, etc.) (Greendale et al. 1999; Marlatt et al. 2022).

I.2 Le cycle menstruel naturel et les variations hormonales ovariennes associées

I.2.1 Description du cycle menstruel naturel

Le cycle menstruel naturel implique des interactions synchronisées à différents niveaux : utérins, ovariens et hormonaux, sur une durée moyenne de $27,7 \pm 2,4$ jours (Cole et al. 2009). Ce cycle est caractérisé par les variations des hormones ovariennes endogènes, que sont les estrogènes (17 β -estradiol (E2), estrone et estriol ; E2 étant le principal estrogènes) et la progestérone (P4). À partir de leurs concentrations, 2 à 6 phases peuvent être considérées selon les définitions (Mihm et al. 2011; Dokumacı and Hazir 2019). Toutefois, la majorité des études caractérise le cycle menstruel en 2 phases, elles-mêmes subdivisées en 3 sous-phases (**Figure 15**) (D'Souza et al. 2023). Le premier jour des menstruations marque le début d'un nouveau cycle menstruel avec la phase folliculaire, qui se termine au moment de l'ovulation (durée moyenne de $14,7 \pm 2,4$ jours) (Cole et al. 2009). Sa variabilité intra- et inter-individuelle en fait la phase la plus déterminante dans la durée totale du cycle. La phase lutéale correspond à la période post-ovulatoire et se termine au premier jour des menstruations suivantes (durée moyenne de $14,6 \pm 3,1$ jours) (Cole et al. 2009). Les sous-phases des périodes folliculaires et lutéales sont décrites ci-dessous.

La phase folliculaire

Phase menstruelle (début de la phase folliculaire). Au cours de cette période, de 4 à 6 jours en moyenne, les concentrations hormonales ovariennes sont faibles. Un écoulement menstruel correspondant à la dégradation de la muqueuse utérine se produit lorsque la fécondation n'a pas eu lieu (Mihm et al. 2011).

Milieu de la phase folliculaire. La libération pulsatile de la GnRH par l'hypothalamus déclenche la libération progressive de l'hormone folliculostimulante (FSH) par l'antéhypophyse (Silberstein and Merriam 2000). Au niveau des ovaires, la FSH stimule la croissance des follicules primordiaux, enclenchant la maturation des ovocytes par la multiplication des cellules de la thèque et de la granulosa, qui sécrètent de l'E2 (Richards 2018). Les concentrations en E2 augmentent avec la croissance des follicules jusqu'à la maturité de l'un d'entre eux et entraînent un épaissement de l'endomètre et un changement de la consistance de la glaire cervicale, facilitant le passage des spermatozoïdes et donc de la fécondation (Silberstein and Merriam 2000).

Ovulation (fin de la phase folliculaire). La forte concentration en E2 entraîne un rétrocontrôle positif sur l'antéhypophyse et stimule la sécrétion d'hormones lutéinisantes (LH) (Silberstein and Merriam 2000). La rupture du follicule dominant, arrivé à maturation et contenant un ovocyte, déclenche l'ovulation sous l'effet du pic de LH. L'ovule entre alors dans la trompe utérine et peut être fécondé dans un délai de 24 heures (Mihm et al. 2011).

La phase lutéale

Début de la phase lutéale. Le follicule ayant expulsé l'ovocyte se transforme en corps jaune, constitué de cellules lutéinisées. Celles-ci sécrètent de l'inhibine (inhibant la sécrétion de FSH), de l'E2 et surtout de la P4 (inhibant la sécrétion de GnRH) (Mihm et al. 2011). La baisse des concentrations en E2 et l'augmentation de la P4 entraînent une augmentation de la température corporelle, une vascularisation de l'endomètre et une augmentation de la sécrétion de mucus par les glandes utérines permettant d'accueillir un éventuel embryon (Richards 2018).

Milieu de phase lutéale. Si aucune fécondation n'a eu lieu, le mucus cervical s'épaissit, empêchant les spermatozoïdes de se mouvoir et de migrer dans les trombes utérines. Le corps jaune s'atrophie et la sécrétion d'hormones utérines se dissipe progressivement (Richards 2018).

Fin de phase lutéale. Quand la concentration de P4 atteint son niveau le plus bas, les artères spiralées dans l'endomètre dégénèrent. La dégradation de la muqueuse utérine se déclenche et marque alors le début d'un nouveau cycle (Mihm et al. 2011).

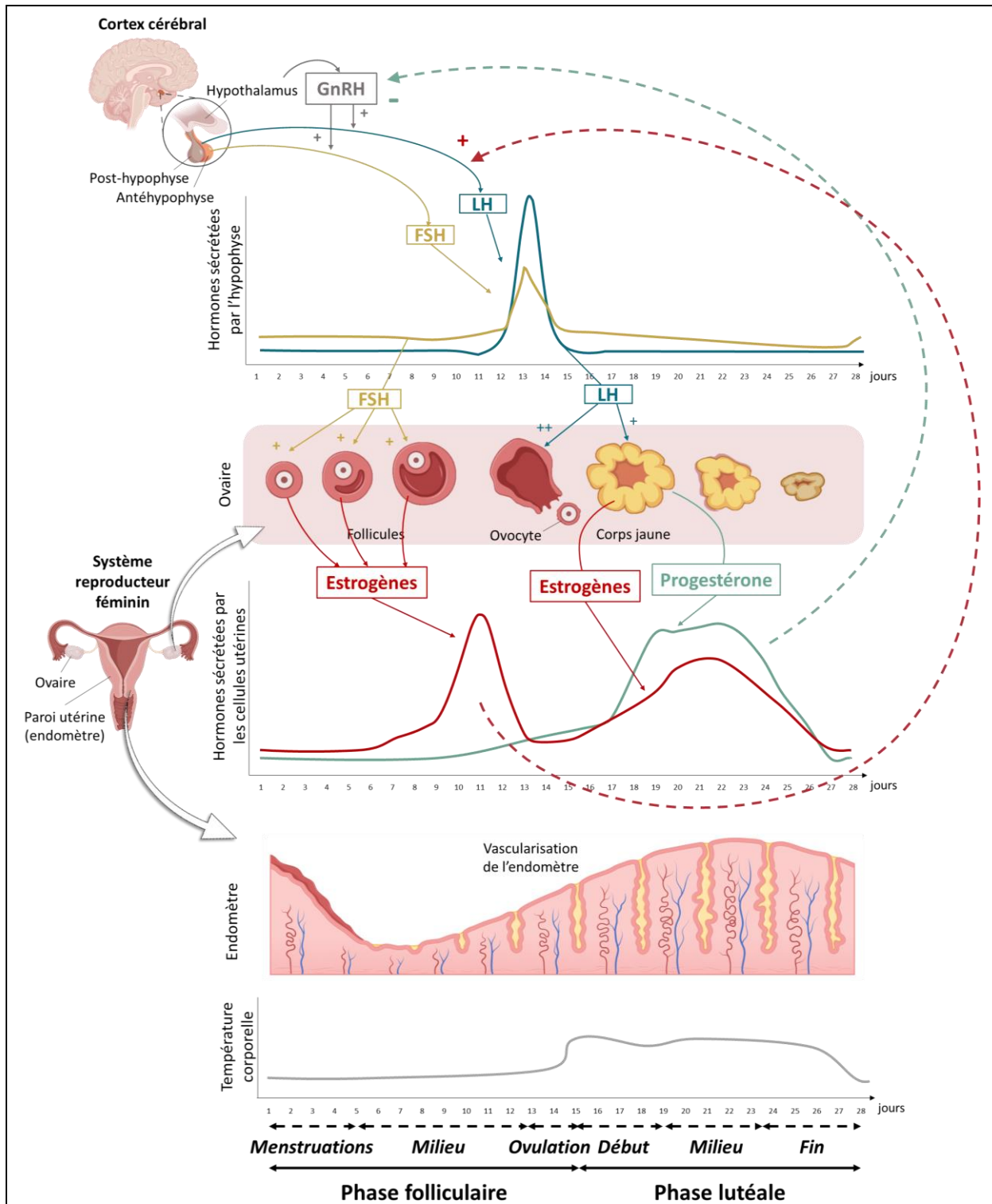


Figure 15. Variations des concentrations des hormones ovariennes et modifications physiologiques associées au cours des différentes phases du cycle menstruel dans le cadre d'un cycle ovarien moyen de 28 jours.

FSH : hormone folliculostimulante, GnRH : gonadotrophine, LH : hormone lutéinisante.

Il existe une importante variabilité à la fois inter- (entre chaque femme) mais également intra-individuelle (entre les cycles d'une même femme) des cycles menstruels. Les cycles peuvent différer tant en durée qu'en termes de concentrations ovariennes hormonales (D'Souza et al. 2023). Cependant, il est tout de même possible de considérer des intervalles de concentration des hormones ovariennes caractérisant les différentes phases du cycle en fonction des méthodes de quantification (Tableau 1).

Tableau 1. Ordre de grandeur des concentrations en 17 β -estradiol et progestérone selon les phases du cycle menstruel et les méthodes de quantifications utilisées.

Méthode de quantification	17 β -Estradiol (E2)		Progestérone (P4)	
	Sanguin (pmol.l ⁻¹)	Salivaire (pmol.l ⁻¹)	Sanguin (nmol.l ⁻¹)	Salivaire (nmol.l ⁻¹)
Phase folliculaire				
<i>Menstruations</i>	58 - 225	1 - 4	0,3 - 3,8	0,09 - 0,20
<i>Milieu folliculaire</i>	113 - 491	2 - 5	0,3 - 1,6	0,05 - 0,20
<i>Ovulation</i>	651 - 939	3 - 8	0,3 - 4,1	0,05 - 0,25
Phase lutéale	451 - 552	3 - 6	22,4 - 60,4	0,15 - 0,50

Les concentrations sanguines correspondent aux intervalles de confiance à 95% issues des données de Stricker et al. 2006. Les données salivaires correspondent aux valeurs hautes et basses des écart-types à la moyenne extraits des données de Celec et al. 2009.

Une femme est considérée comme « eumenorrhée » si elle : i) présente des cycles réguliers et ovulatoires d'une durée moyenne de 21 à 35 jours au cours des 3 derniers mois, ii) a au moins 10 cycles consécutifs par an, iii) n'a pas utilisé de contraception hormonale au cours des 3 derniers mois, et iv) a des cycles menstruels caractérisés par des concentrations hormonales en adéquation avec les normes biologiques (Elliott-Sale et al. 2021; Elliott-Sale 2023). Selon Elliott-Sale et al., 4 étapes clés peuvent être considérées avec des taux d'E2 et P4 différents (Elliott-Sale et al. 2021; Elliott-Sale 2023) : i) le début des menstruations avec des concentrations faibles en E2 et P4, ii) le pic d'E2 et des concentrations faibles de P4 (< 6,36 nmol.l⁻¹), 14 à 26 heures avant l'ovulation et le pic de LH, iii) les concentrations d'E2 qui diminuent et un pic de LH ou un test urinaire positif confirmant une ovulation (Janse DE Jonge et al. 2019) et iv) le milieu de la phase lutéale, soit environ 7 jours après l'ovulation, durant laquelle les concentrations d'E2 réaugmentent et des concentrations de P4 sont supérieures à 16 nmol.l⁻¹ permettant d'exclure une insuffisance lutéale.

I.2.2 Les symptômes menstruels et prémenstruels chez les athlètes féminines

Bien qu'il existe une grande variabilité inter-individuelle, les symptômes prémenstruels (SPM) et menstruels (SM) sont ressentis par une grande majorité d'athlètes féminines (Meignié et al. 2021; Momma et al. 2022). Ces derniers sont perçus en fin de phase lutéale (généralement la semaine précédant les menstruations) (SPM) et/ou au cours des menstruations (SM). Ils peuvent être d'ordre physique (douleurs musculaires, maux de tête, crampes, fatigue, etc.), psychologique (stress, changements d'humeur, etc.) ou comportemental (fringales alimentaires, etc.) (Hantsoo et al. 2022). Les douleurs menstruelles, qualifiées sous le terme de « dysménorrhée », seraient, par ailleurs, moins perçues chez les athlètes féminines que les non-athlètes en raison d'un meilleur flux sanguin, d'une production de prostaglandines réduite et des concentrations d'endorphines plus élevées, en lien avec la pratique régulière d'activité physique (Momma et al. 2022). Toutefois, dans l'étude transversale de Ekenros et al., 74% des 318 athlètes interrogées ayant un cycle menstruel naturel déclaraient présenter une dysménorrhée et 78% faisaient l'expérience de SPM. Selon différentes études, les SPM et SM d'ordre physique le plus fréquemment mentionnés sont les crampes abdominales (53-90%), les douleurs dans la poitrine (48%) et les maux de tête (41%) (Ekenros et al. 2022; Pinel et al. 2022; Hantsoo et al. 2022; Mkumbuzi et al. 2022). La fatigue est un symptôme également très évoqué (57-84%), qui pourrait être lié à la perte de fer lors des menstruations (pouvant aller jusqu'à l'anémie ferriprive) ou encore à une chute de la production de la sérotonine en lien avec la baisse de l'E2 (Amin et al. 2005). Les symptômes psychologiques et comportementaux les plus courants sont les fringales alimentaires (85%), les changements d'humeur (52%) et l'irritabilité (48%) (Ekenros et al. 2022; Pinel et al. 2022; Hantsoo et al. 2022; Mkumbuzi et al. 2022). La plupart des athlètes féminines semblent ressentir un effet négatif de ces symptômes sur leur pratique et leur performance sportive aussi bien en période prémenstruelle (43%) que menstruelle (50%) (Ekenros et al. 2022; McHaffie et al. 2022). Chez les athlètes, le cycle menstruel peut donc apparaître comme un frein à l'entraînement ou à l'optimisation de ce dernier dans un objectif de performance, et un certain nombre d'entre elles déclarent utiliser une contraception hormonale pour limiter ces désagréments (Schaumberg et al. 2018; Martin et al. 2018).

I.2.3 Les troubles du cycle menstruel et leur prévalence chez les athlètes féminines

Il existe différents types de troubles du cycle menstruel (**Tableau 2**). Généralement, les cycles sont dits « irréguliers » s'ils sont d'une durée moyenne en dehors de l'intervalle de 21 à 35 jours

(Elliott-Sale 2023), tandis que certaines sources considèrent un intervalle de 24 à 38 jours (Bouchard et al. 2023). Outre les signes « visibles » des troubles du cycle menstruel, les troubles dits « asymptomatiques » peuvent être détectés par détermination des concentrations en hormones ovariennes (déficience de la phase lutéale, anovulation), dont la prévalence est particulièrement importantes au sein de la population d'athlètes féminines (Duclos 2020; Elliott-Sale et al. 2021; Mountjoy et al. 2023).

Tableau 2. Termes pouvant caractériser le cycle menstruel et leurs définitions associées dans la recherche.

Terme	Définition
Euménorrhée	Cycle menstruel d'une durée de 21 à 35 jours (bornes incluses), soit 10 menstruations consécutives sur l'année ou plus. Confirmation d'un pic de LH, justifiant l'ovulation, et des concentrations hormonales en adéquation avec les normes biologiques. Pas d'utilisation de contraception hormonale depuis au moins 3 mois.
Aménorrhée primaire	Ménarche non apparue à l'âge de 15 ans quand le développement des caractères sexuels secondaires est présent, ou ménarche non apparue à l'âge de 14 ans quand les caractères sexuels secondaires ne sont pas présents.
Aménorrhée secondaire	Absence de plus de 3 périodes de menstruations consécutives chez des femmes, hors grossesse, ayant déjà eu des menstruations par le passé, pouvant être provoqué par une maladie gynécologique ou une faible disponibilité énergétique.
Oligoménorrhée	Cycle menstruel de plus de 35 jours (ou 38 selon les sources).
Polyménorrhée	Cycle menstruel de moins de 21 jours (ou 24 selon les sources).
Anovulation	Saignements menstruels sans ovulation.
Déficience de la phase lutéale	Cycle menstruel avec un taux de progestérone $< 16 \text{ nmol.l}^{-1}$ en milieu de phase lutéale.
Dysménorrhée primaire	Les saignements menstruels s'accompagnent de douleurs importantes dès les premières règles (d'autres symptômes peuvent être présents en même temps, tels que nausées, vomissements, diarrhée, fatigue, fièvre, irritabilité, douleurs musculaires, vertiges et/ou maux de tête).
Dysménorrhée secondaire	Saignements menstruels auparavant indolores, typiquement secondaires à une maladie gynécologique (d'autres symptômes peuvent être présents en même temps, tels que nausées, vomissements, diarrhée, fatigue, fièvre, irritabilité, douleurs musculaires, vertiges et/ou maux de tête).
Ménorragie	Saignements menstruels anormalement abondants ($> 80 \text{ ml}$) ou prolongés (> 7 jours) qui affectent négativement les fonctions de la vie quotidienne.

LH : hormone lutéinisante. *Adapté de Elliott-Sale et al. 2021.*

Les troubles du cycle menstruel semblent être plus fréquents chez les femmes sportives que non-sportives. En effet, la proportion d'athlètes féminines présentant des troubles du cycle menstruel varie entre 20% et 60% selon les études, dépendant du niveau et du type de sport pratiqué, tandis qu'elle est de 5% à 20% dans la population générale (Loucks and Thuma 2003; Nichols et al. 2007; De Souza et al. 2010). Dans les sports pour lesquels le poids et la composition corporelle sont des facteurs déterminants de la performance (**Chapitre I, Partie I.3.1**), cette proportion est plus élevée et peut

atteindre jusqu'à 79% (Torstveit and Sundgot-Borgen 2005). Plus précisément, les athlètes féminines les plus exposées à ces troubles pratiquent des sports artistiques (24,5% aménorrhées primaires, 30,8% aménorrhées secondaires et 61% oligoménorrhées), d'endurance (11,4% aménorrhées primaires, 55% aménorrhées secondaires et 24,5% d'oligoménorrhées) ou de combat (23,5% aménorrhées et 54,6% oligoménorrhées) (Torstveit and Sundgot-Borgen 2005; Gimunová et al. 2022). Souvent oubliés et/ou non vérifiés car asymptomatiques, les cycles anovulatoires et/ou présentant des déficiences de la phase lutéale représenteraient 52% des cycles menstruels chez les femmes physiquement actives contre 5% chez les femmes sédentaires (De Souza et al. 2010; Janse DE Jonge et al. 2019). Ces observations soulignent l'importance d'un suivi régulier du cycle menstruel et la nécessité de réaliser des mesures biologiques pour détecter de potentiels troubles du cycle menstruel. En effet, les troubles du cycle menstruel peuvent être associés à des symptômes impliquant la santé et la performance des athlètes féminines, tels que des déséquilibres hormonaux, un apport énergétique insuffisant, des carences nutritionnelles, des risques de blessure, ou encore un stress psychologique important (Duclos 2020; Elliott-Sale et al. 2021; Mountjoy et al. 2023).

En raison de leur dépense énergétique élevée à l'exercice (charge d'entraînement élevée, etc.) et/ou d'apports alimentaires insuffisants par rapport à leur dépense énergétique (diminution des apports énergétiques totaux, exclusion de certains groupes d'aliments, etc.), les athlètes féminines semblent prédisposées à une « faible disponibilité énergétique » chronique, ou « *low energy availability* » (LEA). Une disponibilité énergétique insuffisante ($< 45 \text{ kcal.kg MNG}^{-1}.\text{jour}^{-1}$, seuil critique à $30 \text{ kcal.kg MNG}^{-1}.\text{jour}^{-1}$) peut avoir des répercussions négatives sur la santé (santé osseuse, risques cardio-métaboliques, troubles du cycle menstruel, etc.), altérant la performance (baisse des capacités cognitives, de la force, de l'endurance, de la puissance, etc.), regroupées sous le nom de « Déficit Énergétique Relatif dans le Sport » (RED-S) (Mountjoy et al. 2023). Notamment, ce déficit énergétique peut affecter l'axe hypothalamo-hypophyso-gonadique par une réduction de la pulsativité de la GnRH et de la LH, et donc une diminution des taux d'E2 (Duclos 2020). Ainsi, le LEA peut conduire à des troubles du cycle menstruel à travers un continuum de gravité croissante, pouvant aller de l'insuffisance lutéale (phase lutéale de moins de 10 jours), à l'anovulation, l'oligoménorrhée, puis à l'aménorrhée secondaire (De Souza et al. 2014; Duclos 2020; Mountjoy et al. 2023). Lorsqu'une LEA est présente dès le plus jeune âge, notamment dans les sports « à maturité précoce » (gymnastique artistique, patinage artistique, etc.), l'état prépubère peut être prolongé et conduire à une aménorrhée primaire (Torstveit and Sundgot-Borgen 2005).

I.3 La contraception hormonale chez les athlètes féminines

Les différents types de contraception hormonale contiennent des hormones synthétiques : un progestatif seul ou combiné avec un estrogène de synthèse, l'éthinylestradiol étant le plus courant (Tracy 2017). L'utilisation d'un contraceptif a pour fonction première d'éviter une grossesse. Selon la contraception hormonale utilisée, celle-ci peut interrompre l'ovulation, limiter l'accès des spermatozoïdes à l'utérus en provoquant un épaissement du mucus cervical et/ou rendre l'implantation d'un ovule plus difficile par modification de la paroi utérine (Elliott-Sale et al. 2021). Comme illustré dans le **Tableau 3**, il existe différents types de contraception hormonale, pouvant être caractérisés par leur forme (orale, implant, injections, anneau vaginal, stérilet, patch), leur composition (progestatif seul ou combiné avec un estrogène de synthèse), la nature des hormones synthétiques et leurs concentrations (mini-, micro- ou macrodosées) (Tracy 2017). Les contraceptions orales peuvent être monophasiques (c'est-à-dire avec des concentrations d'hormones synthétiques constantes tout au long de la prise), ou bi- ou triphasiques (c'est-à-dire avec des concentrations d'hormones synthétiques variant une ou deux fois au cours de chaque cycle d'utilisation, respectivement). Il existe quatre générations de contraception orale, différenciées par la nature et les concentrations du progestatif qu'elles contiennent et dont les effets secondaires associés, notamment androgéniques, sont différents (Tracy 2017).

Tableau 3. Tableau synthétique des différents types de contraception hormonale.

Forme	Hormones synthétiques (concentration)	Dosage	Formulation	Administration
Contraception combinée (estroprogestative)				
Contraception orale (pilule)	<i>Première génération :</i> Éthinylestradiol (150 µg) + Noréthistérone (50 à 250 µg)	Macrodosée	Monophasique Biphasique Triphasique (Quadriphasique)	Tous les jours pendant 21 jours + placebo sur 7 jours
	<i>Deuxième génération :</i> Éthinylestradiol (20 à 40 µg) + Lévonorgestrel (50 à 200 µg)	Microdosées		
	<i>Troisième génération :</i> Éthinylestradiol (15 à 30 µg) + Gestodène (60 à 100 µg) ou Désogestrel (150 µg)			
	<i>Quatrième génération :</i> Éthinylestradiol (20 à 35 µg) + Norgestimate (180 à 250 µg) ou Drospirénone (3 mg)			
Patch transdermique	Éthinylestradiol (750 µg) + Norelgestromine (6 mg)	Microdosé		Patch à changer tous les 7 jours, 21 jours/28
Anneau vaginal	Éthinylestradiol (2,7 mg) + Etonogestrel (11,7 mg)	Microdosé		Action sur 3 semaines + 1 semaine sans anneau
Contraception progestative				
Contraception orale (pilule)	Lévonorgestrel (30 µg) ou Désogestrel (75 µg) ou Drospirénone (4 mg)	Microdosée Macrodosée (usage thérapeutique uniquement)		Tous les jours sur des cycles de 21 à 28 jours
Injection intra musculaire	Acétate de médroxyprogestérone (150 mg)	Microdosée		Tous les 3 mois
Dispositif intra utérin (stérilet)	Lévonorgestrel (13,5 à 52 mg)	Microdosé		Tous les 3 à 5 ans
Implant	Étonogestrel (68 mg)	Microdosé		Tous les 3 ans

Adapté de Amand and Plu-Bureau 2020.

Les femmes utilisant une contraception hormonale (HC+) ont donc des profils hormonaux différents de celles ayant un cycle menstruel naturel (HC-). D'après plusieurs études, le nombre de sportives HC+ est variable selon le type de sport et le niveau de pratique, mais reste généralement légèrement supérieur à la population générale. En moyenne, 40% à 63% des sportives déclarent utiliser une contraception hormonale (Martin et al. 2018; Ekenros et al. 2022; Baumgartner et al. 2023), contre 30% à 50,5% des femmes en âge de procréer dans la population générale (Lindh et al. 2017; Congy et al. 2024). Bien que l'utilisation de dispositifs intra-utérins soit de plus en plus plébiscitée par la

population générale (Division 2019), la prise d'une contraception orale demeure utilisée par 48,1% à 78,4% des athlètes (Solli et al. 2020; Engseth et al. 2022). Parmi elles, 48% à 69% auraient recouru à une pilule combinée et 31% à 52% utiliseraient une pilule contenant uniquement un progestatif (Martin et al. 2018; Solli et al. 2020; Ekenros et al. 2022). Les autres formes de contraception hormonale les plus utilisées sont variables selon les études : dispositif intra-utérin (14,8% à 32,5%), implant (1,1% à 18,2%) et anneau vaginal (9,4%). Les patchs transdermiques combinés semblent quant à eux peu employés (0,0 à 1,3%) (Engseth et al. 2022; Baumgartner et al. 2023).

Outre la fonction première de la contraception hormonale visant à réguler la fertilité, celle-ci constitue également un moyen de contrôler le cycle menstruel et les symptômes associés. En effet, des études ont mis en avant que l'utilisation d'une contraception orale pourrait avoir des effets bénéfiques, notamment en réduisant les complications cardiovasculaires et limitant les effets de l'hypoestrogénie sur la résorption osseuse chez des femmes aménorrhées ou oligoménorrhées (Väänänen and Härkönen 1996; Ampatzis et al. 2022), ou encore en réduisant l'apparition des SPM et de la dysménorrhée (Ma and Song 2023; Schroll et al. 2023). Par ailleurs, 47% des 679 sportives HC+ interrogées dans l'étude de Ekenros et al. déclarent utiliser une contraception orale pour retarder ou supprimer les saignements, et ainsi limiter les désagréments perçus au cours de leur pratique sportive (Ekenros et al. 2022). Cependant, des effets secondaires associés à l'utilisation d'une contraception hormonale sont également rapportés par 40% des sportives HC+, que ce soit des symptômes physiques (prise de poids, saignements irréguliers, problèmes de peau, migraines, fatigue) ou émotionnels (changements d'humeur) (Martin et al. 2018; Ekenros et al. 2022). Toutefois, l'influence du type de contraceptif utilisé sur ces effets n'est pas encore bien connue. Par exemple, d'après Martin et al., 39,1% des athlètes féminines ayant recouru à une contraception progestative (implants principalement) ont ressenti des effets secondaires négatifs contre 17,8% utilisant une contraception combinée, toutes formes confondues (contraception orale, implant, injection, dispositif intra utérin) (Martin et al. 2018). En revanche, Ekenros et al. n'ont pas trouvé de différence sur les effets secondaires déclarés entre les types de contraception (Ekenros et al. 2022).

POINTS CLÉS

- Chez les femmes sans trouble du cycle menstruel, la période reproductive est caractérisée par des **cycles menstruels réguliers et ovulatoires**, sous l'influence des **variations des hormones ovariennes** : les estrogènes et la progestérone.
- Les **symptômes prémenstruels et menstruels** perçus par les athlètes féminines peuvent entraîner des **répercussions sur leur santé** physique et mentale, **affectant ainsi leur performance**.
- Les athlètes sont plus à risque de présenter des **troubles du cycle menstruel** que la population générale, en lien avec leur haut niveau d'activité physique.
- Pour **réguler la fertilité et/ou les symptômes associés au cycle menstruel**, certaines athlètes ont recours à une **contraception hormonale**, la plus utilisée étant la contraception orale, qui contient un progestatif seul ou combiné à un estrogène de synthèse.
- Bien que l'utilisation d'une contraception hormonale puisse être associée à une réduction des SPM chez les athlètes, elle n'exclut pas le risque **d'effets secondaires**.
- Outre leur rôle premier de régulation de la fonction reproductrice, les hormones ovariennes pourraient, de manière directe et indirecte, influencer la **régulation de la composition corporelle et le métabolisme énergétique au repos et à l'exercice** (Hackney et al. 1994; Isacco et al. 2012a).

II. L'influence du statut hormonal ovarien sur le poids et la composition corporelle chez les athlètes féminines

Les hormones ovariennes endogènes et exogènes jouent un rôle clé dans le système reproducteur. Par ailleurs, plusieurs organes non reproducteurs, tels que l'hypothalamus, le système cardiovasculaire, les tubules rénaux, le foie, les muscles squelettiques et le tissu adipeux, possèdent des récepteurs aux hormones sexuelles (Stachenfeld 2008). Ainsi, les hormones ovariennes peuvent moduler divers systèmes physiologiques, dont la composition corporelle (Stachenfeld 2008). Une influence de ces hormones sur la composition corporelle a été démontrée chez le modèle animal et chez l'Homme, en modifiant les taux d'E2 et de P4. Il a notamment été mis en évidence que : i) les E2 et la P4 favoriseraient la rétention des fluides (Stachenfeld 2008; Giersch et al. 2020), ii) les E2 auraient un effet anabolique tandis que les P4 auraient un effet catabolique sur la masse musculaire (McClung

et al. 2006; Sung et al. 2014; Kissow et al. 2022), ou encore iii) l'E2 favoriserait la croissance de la MG sous-cutanée et limiterait l'augmentation de la MG viscérale (Steiner and Berry 2022). Ainsi, les variations hormonales au cours du cycle menstruel ou les hormones synthétiques contenues dans les contraceptions hormonales pourraient impacter le poids et la composition corporelle des athlètes féminines.

II.1 Cycle menstruel et variation de poids et de composition corporelle chez les athlètes féminines

Les études cliniques s'étant intéressées à l'effet spécifique du statut hormonal sur la régulation du poids et de la composition corporelle chez les femmes actives et les athlètes HC- ne semblent pas s'accorder quant à un potentiel effet des phases du cycle menstruel. En effet, Suh et al. n'ont pas observé de différence de poids ou de composition corporelle (MG déterminée par la méthode des plis cutanés) entre la phase folliculaire (jour 3 à 9 après le premier jour des menstruations) et lutéale (jour 17 à 25) du cycle menstruel chez 8 femmes euménorrhées actives ($3,7 \pm 0,7$ heures d'activité physique par semaine) (Suh et al. 2003). De même, Rael et al. n'ont pas noté de différence de poids ou de composition corporelle (MG, MNG, hydratation ; mesurées par bio-impédance (BIA)) entre la phase folliculaire (en début et fin de phase folliculaire : jours $3,5 \pm 1,2$ et $12,3 \pm 2,8$, respectivement) et lutéale (milieu de phase lutéale : jour $21,9 \pm 2,6$) lors d'un suivi de 21 femmes euménorrhées, entraînées en endurance et résistance (environ 5,1 heures par semaine) (Rael et al. 2021). Des résultats similaires ont été observés au sein d'une population de femmes actives, et les auteurs ont suggéré que les fluctuations hormonales en E2 et P4 au cours du cycle menstruel ne seraient probablement pas suffisamment importantes et prolongées pour induire des changements significatifs de la composition corporelle (Daniusevičiūtė et al. 2010).

À l'inverse, dans leur étude longitudinale, Tomazo-Ravnik et al. ont observé que 65% des 40 femmes actives et sportives suivies présentaient une augmentation du poids, du volume total d'eau corporelle et de la MNG mesurés par BIA en phase lutéale (jour 18 à 23 du cycle, phase du cycle auto-rapportée) par rapport à la phase folliculaire (jour 8 à 12 du cycle) (Tomazo-Ravnik and Jakopič 2006). D'après les auteurs, cette augmentation du poids et de la MNG pourrait être expliquée par l'augmentation du volume d'eau corporelle sous l'effet de l'E2 et de la P4 (Stachenfeld 2008). En effet, plusieurs revues ont souligné la potentielle influence de l'E2 et la P4 sur les systèmes neuronaux et hormonaux à travers le contrôle de l'équilibre des fluides corporels *via* la soif, les apports hydriques et

en sodium, ou encore la régulation rénale (Stachenfeld 2008; Giersch et al. 2020). Des taux élevés d'E2 et P4 pourraient être à l'origine d'une rétention des fluides expliquant une prise de poids en phase lutéale (Szmuiłowicz et al. 2006; Giersch et al. 2020).

Dans son étude, Stachoń a mesuré le poids et la composition corporelle par BIA dans des conditions standardisées en phases folliculaire, ovulatoire et lutéale chez 40 athlètes féminines pratiquant des sports d'équipes ($4,0 \pm 0,5$ heures par semaine) naturellement menstruées (Stachoń 2016). Les phases du cycle menstruel ont été déterminées par méthode « calendaire », le jour de l'ovulation ayant été estimé au jour 14 avant le premier jour de règles plus ou moins 2 jours. Les analyses ont été séparées en deux groupes selon la corpulence des femmes en phase folliculaire : l'IMC (plus ou moins de $21,7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$), l'adiposité (indice d'adiposité sous-cutanée supérieur ou inférieur à 23,2, par plis cutanés) et le niveau d'hydratation (plus ou moins de 54,7%, par BIA). Un poids significativement plus élevé en phase lutéale a été observé par rapport à la phase folliculaire, et de manière plus importante chez les femmes ayant une moindre adiposité (+0,800 kg). De manière similaire, une augmentation de la MG (BIA) en phase lutéale a été observée uniquement chez les athlètes présentant une meilleure hydratation (+0,660 kg) et une moindre adiposité (+0,540 kg), principalement au niveau du tissu sous-cutané abdominal et glutéo-fémoral. L'auteur suggère que l'influence des hormones ovariennes sur les variations de poids et de composition corporelle au cours du cycle menstruel chez les athlètes féminines pourrait dépendre de leur corpulence. Ainsi, les femmes les plus hydratées ayant une adiposité initiale plus faible seraient particulièrement sensibles aux fluctuations hormonales (Stachoń 2016). Toutefois, la détermination des phases du cycle menstruel par méthode « calendaire » et auto-rapportée, sans vérification des concentrations en E2 et P4, dans les deux études précédemment décrites constitue une limite méthodologique importante.

Pour limiter les biais liés aux méthodes de mesure, Koşar et al. ont réalisé des mesures de poids et de composition corporelle à la fois par BIA et par ostéodensitométrie (DXA), chez 30 femmes actives euménorrhées (cycle menstruel d'une durée moyenne de $28,3 \pm 1,7$ jours), au milieu de la phase folliculaire (jours 7 à 9 après le premier jour des menstruations) et au milieu de la phase lutéale (jours 21 à 23) (Koşar et al. 2022). Alors qu'un poids plus élevé en phase lutéale a été observé (+0,490 kg par BIA, +0,330 kg par DXA), le volume total d'eau corporelle et la MG totale et sa localisation (absolue et relative) étaient similaires entre les deux phases du cycle. La masse musculaire et la MNG au niveau androïde étaient en revanche plus élevés en phase lutéale. Les auteurs ont également souligné une grande variabilité inter-individuelle, ne permettant pas de généraliser les résultats de manière certaine. Au-delà de la rétention des fluides, les hormones ovariennes pourraient impacter leur répartition : des concentrations élevées d'E2 favoriseraient la rétention de liquide extracellulaire au

niveau vasculaire, tandis que des niveaux élevés à la fois en E2 et en P4 favoriseraient la rétention de liquide dans l'espace interstitiel (Stachenfeld and Taylor 2004; Stachenfeld 2008). Ainsi, les auteurs ont suggéré que l'augmentation de la MNG et de la masse musculaire au niveau androïde serait d'avantage liée à une rétention des fluides dans ces parties du corps (Koşar et al. 2022).

Inversement, si aucune différence de MNG ou d'hydratation n'a été observée chez 52 femmes actives euménorrhées, Thompson et al. ont détecté une MG absolue et relative (mesurée par DXA) significativement supérieure (+0,5%, +0,350 kg) au milieu de la phase lutéale (7 à 9 jours après un test urinaire positif de LH) comparativement à la fin de phase folliculaire (24 heures après un test positif de LH) (Thompson et al. 2021). En revanche, il n'y avait pas de différence significative avec les phases du cycle lorsque la MG était mesurée avec la méthode des plis cutanés ou la BIA. Ces observations soulignent d'une part les potentiels effets des concentrations d'E2 et de P4 sur la distribution des fluides extracellulaires, et d'autre part, l'importance de la méthode de mesure de la composition corporelle.

Finalement, bien que les hormones ovariennes aient une influence sur la composition corporelle, les variations cycliques et rapides au cours du cycle menstruel ne semblent pas suffisantes pour modifier de manière significative la MNG ou la MG et sa répartition. Les modifications du poids et de composition corporelle rapportées par certaines études pendant le cycle menstruel seraient principalement expliquées par des fluctuations de la rétention de liquides (Isacco et al. 2023).

II.2 Contraception hormonale et variations de poids et de composition corporelle chez les athlètes féminines.

Bien que la prise de poids soit un effet secondaire souvent évoqué par les femmes HC+ (Picardo et al. 2003), les résultats des études ayant réalisé des mesures de poids et de composition corporelle chez des femmes actives ou sportives sous contraception hormonale semblent variables.

Procter-Gray et al. ont réalisé une étude auprès de 150 coureuses HC-, dont 50 présentaient des cycles menstruels irréguliers au cours de l'année précédente (Procter-Gray et al. 2008). Soixante-neuf d'entre elles ont utilisé une contraception orale combinée microdosée pendant 2 ans. Les mesures de poids et de composition corporelle par DXA n'ont révélé aucune modification significative du poids et de la MG chez les athlètes HC+ comme HC- à l'issue des 2 ans. Cependant, dans l'étude de Suh et al., les 8 femmes actives décrites en **Partie II.1** ont utilisé une contraception orale combinée triphasique

microdosée pendant 4 mois (Suh et al. 2003). Une augmentation significative mais légère du poids (+3%) et de la MG (+9%) (mesurée par la méthode des plis cutanés) a été observée en période HC+ par rapport à la période HC- (que ce soit en phase folliculaire comme lutéale), tandis qu'aucune variation n'a été observée entre les phases de contraception active et inactive. Ces résultats corroborent ainsi la conclusion de Gallo et al. selon laquelle un effet significatif de l'utilisation d'une contraception orale combinée sur le poids semble peu probable (Gallo et al. 2014). Tandis que Suh et al. n'ont pas observé de modification de la MNG (Suh et al. 2003), Procter-Gay et al. ont mis en avant une association positive entre l'utilisation de la contraception orale et la prise de MNG ($+0,77 \pm 0,17 \text{ kg.an}^{-1}$) chez les athlètes initialement euménorrhées (définies ici comme ayant 10 cycles menstruels ou plus au cours de la dernière année) (Procter-Gray et al. 2008). D'après les auteurs, cette observation pourrait être expliquée par une action anabolique de l'E2 sur la masse musculaire à travers une augmentation des concentrations sériques en hormone de croissance, effet mis en évidence chez le modèle animal (Leung et al. 2004; McClung et al. 2006; Kitajima and Ono 2016). Cependant, le mécanisme anabolisant des contraceptifs oraux combinés sur la MNG reste incertain puisque l'usage d'une contraception orale a précédemment été associée à une baisse des hormones androgènes ainsi qu'une réduction de la MNG chez des femmes pré-ménopausées (Miller et al. 2007). Enfin, les différences de résultats observés entre ces études suggèrent que le niveau d'activité physique des femmes pourrait être un facteur influençant ces adaptations.

Rael et al. ont mesuré le poids, la MG, la MNG et l'hydratation par BIA chez 33 femmes entraînées en endurance ($4,9 \pm 3,1 \text{ h.semaine}^{-1}$), sous contraception orale monophasique combinée. Les résultats n'ont montré aucune différence entre phases de pilule non-active (jour 4,8 \pm 1,7 de la plaquette) *versus* active (jour 21,0 \pm 4,9) (Rael et al. 2021). Similairement, Thompson et al. ont comparé le poids et la composition corporelle (mesurée par la méthode des plis cutanés, BIA et DXA) de 30 femmes actives lors de trois périodes distinctes de leur prise de contraception orale combinée monophasique : une fois en prise de placebo (jours 4 à 7 de la plaquette), et deux fois en prise de pilule active (début de la phase active : jours 11 à 14, et fin de la phase active : jours 24 à 28) (Thompson et al. 2021). Seuls les résultats issus des mesures par DXA ont montré une diminution du pourcentage de MG et une augmentation de la quantité de MNG à la fin par rapport au début de la phase active de la contraception orale. L'éthinylestradiol a été précédemment identifié comme le principal facteur influençant la régulation de l'eau corporelle lors de l'utilisation de contraceptifs oraux (Stachenfeld et al. 1999). Certaines études indiquent que les taux plasmatiques d'estrogènes synthétiques peuvent être deux fois plus élevés à la fin de la phase active de la contraception orale combinée monophasique (jour 21) comparativement au premier jour (Endrikat et al. 2002; Blode et al. 2012), ce qui influencerait la répartition des fluides extracellulaires et pourrait expliquer ces observations. Toutefois,

similairement aux résultats exposés chez les femmes HC- dans la **Partie II.1**, ces différences demeurent négligeables et les auteurs n'avancent pas d'effet majeur de la phase de la contraception orale sur la régulation du poids et de la composition corporelle.

La récente revue narrative de Isacco et al. a mis en évidence que l'utilisation d'une contraception hormonale combinée ne semblerait pas influencer le poids, la MG ni sa localisation, tandis que la contraception progestative injectable à base d'acétate de médroxyprogestérone retard favoriserait une accumulation de MG abdominale (Isacco et al. 2023). De même, deux revues Cochrane n'ont pas mis en lumière d'influence claire de l'utilisation d'une contraception hormonale sur la prise de poids sur le court (jusqu'à 6 mois d'utilisation), moyen (jusqu'à 1 an d'utilisation) et long terme (plusieurs années d'utilisation), soulignant un manque de preuves et une faible qualité des études incluses (Gallo et al. 2014; Lopez et al. 2016). Davantage d'études robustes sont nécessaires pour déterminer les effets de l'utilisation d'une contraception hormonale combinée (orale ou patch) ou progestative seule (orale, injections, implants ou dispositif intra utérin) sur l'évolution du poids ou de la composition corporelle.

Finalement, comme observé chez les femmes HC-, le peu de travaux conduits chez les femmes HC+ suggèrent une influence des hormones ovariennes sur la répartition des fluides dans les tissus, susceptible d'induire une prise de poids ou une modification de la composition corporelle. Toutefois, les résultats contradictoires et la diversité des méthodes de mesure utilisées ne permettent pas de conclure de manière certaine quant à l'effet de l'utilisation d'une contraception hormonale sur le poids ou la composition corporelle chez les athlètes féminines.

POINTS CLÉS

- L'influence du statut hormonal ovarien sur le poids et/ou la composition corporelle chez les femmes actives et sportives reste **sous-étudiée et peu comprise**.
- Bien que certaines études aient suggéré un effet de l'E2 sur la composition corporelle *via* son influence sur la **répartition des fluides extracellulaires**, d'autres ont émis l'hypothèse que les **fluctuations cycliques en E2 et P4 pourraient être insuffisantes** pour induire des effets détectables sur le poids et la composition corporelle.
- La **disparité entre les résultats** observés peut s'expliquer par des **différences méthodologiques**, notamment dans les techniques de mesure de la composition corporelle (plis cutanés, BIA, DXA), le niveau d'activité physique des femmes, la détermination des phases du cycle menstruel ou le type de contraception hormonale considéré.

III. L'influence du statut hormonal ovarien sur le métabolisme énergétique chez les athlètes féminines

Les études menées chez le modèle animal et chez les humains suggèrent que les fluctuations des hormones ovariennes au cours du cycle menstruel seraient impliquées, de manière directe ou indirecte, dans le métabolisme énergétique au repos et à l'exercice (Sladek 1974; Kendrick et al. 1987; Constantini et al. 2005; Tarnopolsky 2008; Oosthuyse and Bosch 2010; Maher et al. 2010; Vieira-Potter et al. 2015). Ainsi, le statut hormonal ovarien pourrait influencer la dépense d'énergie et l'utilisation des substrats énergétiques chez les athlètes, et entraîner des répercussions sur leur santé et leur performance.

III.1 L'effet du cycle menstruel sur le métabolisme énergétique de l'athlète féminine

III.1.1 Cycle menstruel et métabolisme énergétique au repos

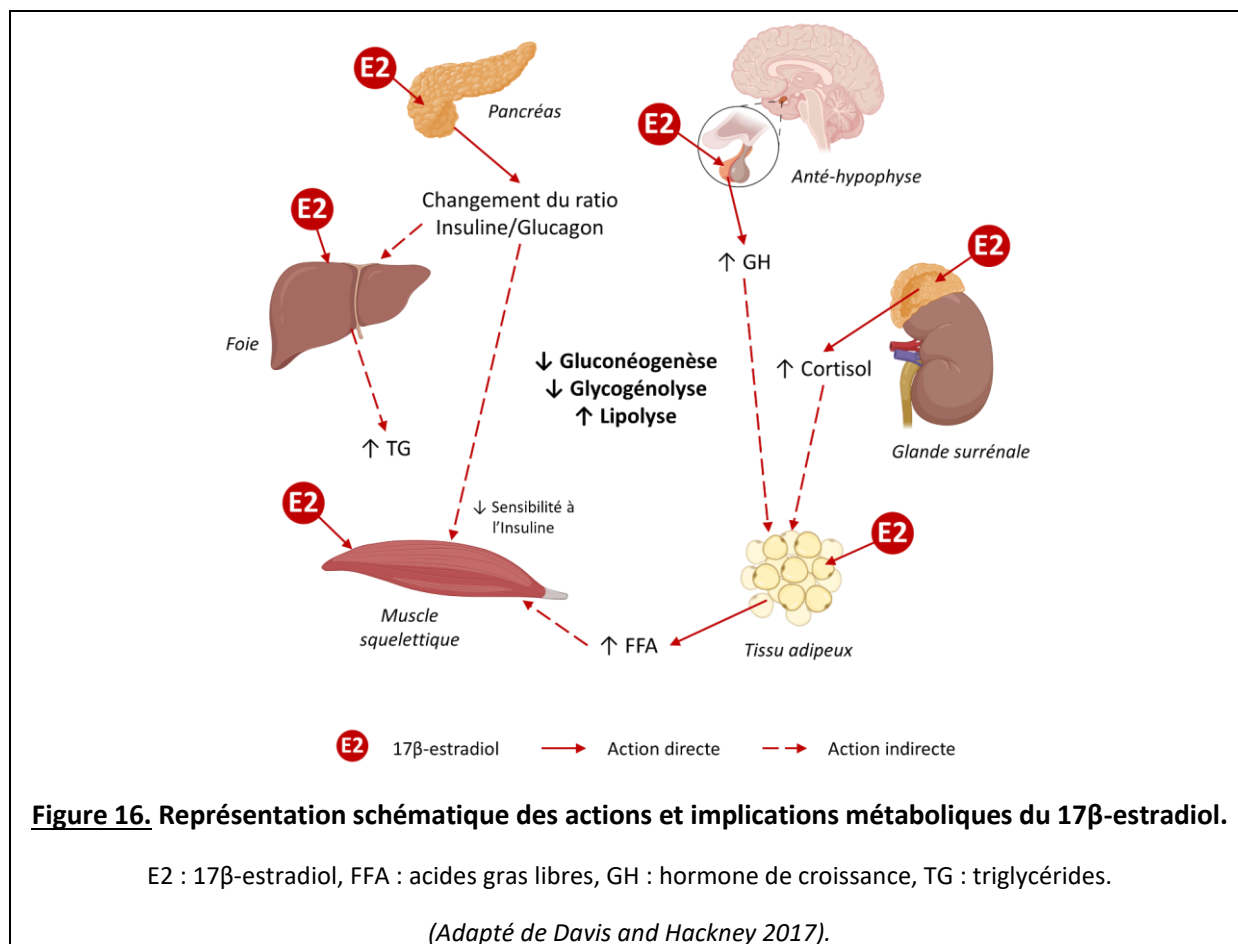
Les études sur l'influence du cycle menstruel sur le métabolisme énergétique au repos chez les femmes, quel que soit leur niveau d'activité physique, révèlent des résultats controversés dans la

littérature scientifique. Dans leur méta-analyse de 2020, Benton et al. ont souligné une DER légèrement plus importante en phase lutéale qu'en phase folliculaire ($SDM = 0,33$; $95\%IC = [0,17 ; 0,49]$; $p < 0,001$) chez des femmes normo-pondérées présentant des niveaux d'activité physique variés, suggérant une augmentation de la DER avec des concentrations élevées en E2 et en P4 (Benton et al. 2020). Ces résultats sont en accord avec des études antérieures ayant mis en évidence une modulation de la DER en fonction des concentrations en E2. Par exemple, une réduction de la DER de 3% à 5% a été observée chez des femmes pré-ménopausées 6 jours après la diminution des concentrations d'E2 et P4 à des niveaux post-ménopausiques par un antagoniste de la GnRH (Day et al. 2005). Dans une autre étude, cette réduction de la DER disparaissait après une injection transdermique d'E2 à des niveaux attendus en milieu et fin de phase folliculaire (Melanson et al. 2015). Les effets de l'E2 sur la DER ont été attribués, en partie, à une augmentation de l'activité mitochondriale au niveau du tissu adipeux brun. Les mécanismes d'action de l'E2 seraient à la fois directs sur ce tissu, mais aussi indirects au niveau du système nerveux central en stimulant le SNS (Gavin et al. 2018; Vigil et al. 2022). Cependant, seulement 47% des 26 études incluses dans la méta-analyse ont rapporté une DER significativement supérieure en phase lutéale (Benton et al. 2020). Benton et al. ont souligné que les résultats hétérogènes entre les études pourraient être expliqués par leur faible qualité. La variabilité des méthodes de mesure de la DER, des phases et des sous-phases du cycle menstruel considérées et de leurs méthodes de détermination, ainsi que du niveau d'activité physique des femmes, invitent à prendre les conclusions de cette revue avec précaution (Benton et al. 2020). Plus spécifiquement, des études réalisées chez des femmes actives n'ont pas rapporté de différence significative de la DER entre les phases du cycle (Horton et al. 2002; Matsuda-Nakamura et al. 2015; Rael et al. 2021), bien que celle-ci puisse parfois tendre à être plus élevée en milieu de phase lutéale qu'au début ou au milieu de la phase folliculaire (Horton et al. 2002; Löfberg et al. 2024).

Dans la récente étude de Kuikman et al., 11 rugbywomen de haut niveau engagées dans un centre d'entraînement pendant 5 semaines ont été sollicitées à trois reprises au cours de leur cycle menstruel (Kuikman et al. 2024). Aucune différence significative de leur DER, absolue et relative à la MNG, n'a été constatée entre le début de la phase folliculaire (jour $1,8 \pm 0,4$), la fin de la phase folliculaire (jour $11,4 \pm 1,4$ avec test urinaire positif indiquant un taux élevé d'E2, précédant le pic de LH de 14 à 26 h) et le milieu de la phase lutéale (jour $20,8 \pm 1,6$, soit 7 jours après test urinaire positif ou jour 21 du cycle à défaut d'une preuve d'ovulation) (Kuikman et al. 2024). Toutefois, les vérifications de l'ovulation par test urinaire et les prélèvements sanguins permettant de vérifier rétrospectivement le profil hormonal des athlètes ont révélé qu'une seule des 11 participantes était euménorrhée. Parmi les 10 autres athlètes, 5 étaient naturellement menstruées mais n'avaient pas le profil hormonal attendu (concentrations plasmatiques d'E2 plus élevées en milieu de phase lutéale qu'en fin de phase

folliculaire) et 5 présentaient un trouble du cycle menstruel (n = 1 cycle anovulatoire, n = 1 déficience de la phase lutéale et n = 3 oligoménorrhées) (Mckay et al. 2024), limitant ainsi toute conclusion chez ces athlètes en haute charge d'entraînement. Par ailleurs, aucune corrélation n'a été mise en évidence entre la DER et les concentrations en E2, en P4 et le ratio E2/P4. Kuikman et al. ont supposé que cette absence de différence serait en partie expliquée par la variation quotidienne intra-individuelle de la DER (estimée entre 3% et 5%) (Bader et al. 2005; Compher et al. 2006), qui pourrait être plus importante que l'effet du cycle menstruel (Kuikman et al. 2024; Löfberg et al. 2024).

Des études sur des modèles animaux et chez l'humain supplémenté en E2 ont mis en lumière son influence sur le métabolisme des substrats énergétiques au repos (Sladek 1974; Ellis et al. 1994; Maher et al. 2010). L'E2 favoriserait l'oxydation des lipides et augmenterait la lipolyse en stimulant les voies impliquées dans le métabolisme des lipides dans le muscle squelettique et en réduisant la lipogénèse dans les adipocytes, le foie et les muscles (Isacco et al. 2012a; Hackney 2021). Les mécanismes physiologiques par lesquels l'E2 influence le métabolisme des substrats énergétiques comprennent à la fois des actions directes et indirectes (Davis and Hackney 2017; Hackney 2021) (**Figure 16**). Brièvement, les actions directes illustrent une influence de l'E2 sur l'activation des enzymes lipolytiques (lipoprotéine lipase, lipase hormono-sensible) (Ellis et al. 1994; Oosthuysen and Bosch 2010) et l'augmentation des acides ribonucléiques messagers et des protéines codantes pour des gènes de la β -oxydation (carnitine palmitoyltransférase I, β -hydroxyacyl-CoA déshydrogénase) (Campbell and Febbraio 2001), favorisant ainsi la mobilisation et l'oxydation des acides gras libres (Kendrick et al. 1987; Hatta et al. 1988; Campbell and Febbraio 2001; Isacco and Boisseau 2023). Les actions indirectes sont, notamment, associées au rôle de l'E2 dans la sensibilité à l'insuline et l'activation des hormones lipolytiques (hormone de croissance, cortisol), favorisant la lipolyse et la glycogénèse (Davis and Hackney 2017; Hackney 2021). Cependant, chez les femmes euménorrhées, les résultats des études comparant la mobilisation et l'utilisation des substrats entre les phases du cycle menstruel restent controversés (Hackney 1990; Horton et al. 2002; Isacco et al. 2014; Rael et al. 2021; Löfberg et al. 2024).



Des études réalisées auprès de femmes actives et sportives HC- n'ont pas observé de différences de la mobilisation et/ou l'utilisation des substrats énergétiques au repos en fonction des phases du cycle menstruel (Bailey et al. 2000; Horton et al. 2002; Matsuda-Nakamura et al. 2015; Rael et al. 2021). L'étude de Horton et al. réalisée chez 10 femmes euménorrhées actives (> 90 minutes d'exercice aérobie par semaine) n'a révélé aucune différence significative des concentrations plasmatiques de glucose, des acides gras libres, du lactate et de glycérol entre les phases début-folliculaire (jours 1 à 4 du cycle), mi-folliculaire (jours 8 à 11) et mi-lutéale (jours 19 à 23), en accord avec des précédentes études (De Souza et al. 1990; Bailey et al. 2000). Les récents travaux de Löfberg et al., conduits chez des femmes modérément actives (150 à 300 minutes d'activité d'intensité modérée par semaine) et euménorrhées, n'ont pas mis en évidence de modification significative du QR entre les phases folliculaire (1 à 5 jours après la fin des menstruations) et lutéale (4 à 8 jours après un test d'ovulation positif), suggérant une proportion de lipides et de glucides oxydés similaire entre les phases du cycle menstruel (Löfberg et al. 2024). En ce sens, la méta-analyse de D'Souza et al. n'a pas mis en évidence de modification significative du QR entre les phases folliculaire et lutéale au repos chez des femmes de tout niveau d'activité physique confondu (SDM = 0,05 ; 95%IC = [-0,15 ; 0,25] ;

$p = 0,22$). Les auteurs ont ainsi supposé que les variations en E2 et P4 au cours du cycle menstruel seraient insuffisantes pour induire une modification de l'utilisation des substrats énergétiques. Comme précédemment mentionné dans la méta-analyse de Benton et al., l'hétérogénéité des définitions et des méthodes de détermination des phases du cycle menstruel pourraient justifier les discordances observées entre les études (D'Souza et al. 2023). De plus, la large distribution des profils mesurés de l'E2 et de la P4 tout au long du cycle menstruel illustrent la complexité d'isoler des effets physiologiques spécifiques à des phases distinctes du cycle menstruel chez la femme et d'attribuer ces effets à une hormone particulière (Sims and Heather 2018; Oosthuyse et al. 2023).

Toutefois, comme rapporté par Hackney, bien que la plupart des études ne semble pas mettre en évidence de modification significative de l'utilisation des substrats énergétiques au repos entre les phases du cycle menstruel, les réserves énergétiques pourraient quant à elle être modifiées au cours du cycle menstruel (Hackney 2021). Dans son étude de 1990, Hackney a souligné que les concentrations de glycogène musculaire (au niveau du vaste latéral) au repos étaient plus élevées au milieu de la phase lutéale (jour 22 ± 1 du cycle) par rapport au milieu de la phase folliculaire (jour 8 ± 1 du cycle) (Hackney 1990). Les concentrations plasmatiques élevées d'E2 et de P4 au milieu de la phase lutéale favoriseraient ainsi une épargne du glycogène musculaire. Bien que cette étude n'ait pas été réalisée chez des femmes sportives, ces observations suggèrent que de moindres réserves en glycogène au milieu de la phase folliculaire du cycle menstruel chez les femmes pourrait influencer leur capacité d'endurance à l'exercice et donc leur performance (Hackney 1990). Cependant, la transposabilité de ces résultats aux athlètes féminines semble limitée en raison des différences métaboliques et de facteurs extrinsèques (composition corporelle, variabilité inter-individuelle des concentrations en E2 et P4, niveau d'activité physique, etc.).

III.1.2 Cycle menstruel et métabolisme énergétique post-prandial

La thermogénèse post-prandiale correspond à l'énergie dépensée au-delà du métabolisme de base en raison des coûts énergétiques liés à la digestion des aliments et à l'assimilation et au stockage des nutriments (Casanova et al. 2019). Elle peut être estimée à partir de la DEPP au repos après ingestion d'un repas, et elle est associée au contenu calorique et à la composition en macronutriment du repas ingéré (Dabbech et al. 1997). Les protéines contribuent notamment de manière plus importante à la DEPP (20-30%) par rapport aux lipides (0-3%) et aux glucides (5-10%) (Tappy 1996).

À l'heure actuelle, aucune étude ne semble avoir étudié l'effet du cycle menstruel sur le métabolisme énergétique au repos en condition post-prandiale chez des athlètes féminines. Chez des

femmes modérément actives ($3,7 \pm 0,1$ heure de sport par semaine) et euménorrhées, Suh et al. ont montré que les phases du cycle menstruel n'affectaient pas la DEPP, le QR, ni la cinétique de glucose au repos sur une période de 3 heures après un petit-déjeuner standardisé riche en glucides (308 kcal ; 75% glucides, 16% protéines et 9% lipides) (Suh et al. 2002). Cela souligne que la prise alimentaire pourrait avoir une influence plus importante sur la cinétique du glucose que les fluctuations hormonales ovariennes (D'Eon et al. 2002). Les différences métaboliques dépendraient donc partiellement de la demande énergétique et seraient d'avantage influencées par le statut nutritionnel des femmes que par leur statut hormonal ovarien (Oosthuyse and Bosch 2010).

III.1.3 Cycle menstruel et métabolisme énergétique à l'exercice

Comme au repos, des résultats contradictoires ont été observés lors de l'étude de l'effet du cycle menstruel sur le métabolisme énergétique à l'exercice chez la femme. Chez des athlètes féminines régulièrement menstruées ayant réalisé un exercice de pédalage (2 paliers de 25 minutes à 70% puis 90% du seuil lactique), Zderic et al. ont observé des taux de production et d'utilisation du glucose, ainsi qu'une oxydation des glucides plus faibles et une oxydation des lipides plus élevée en phase lutéale (jours 22 à 27 du cycle menstruel) comparativement à la phase folliculaire (jours 4 à 6 du cycle menstruel). De manière similaire, Devries et al. ont observé des taux d'apparition et d'utilisation du glucose et une utilisation du glycogène total inférieurs en phase lutéale par rapport à la phase folliculaire au cours d'un exercice d'endurance (90 minutes de pédalage à 65% du volume d'oxygène consommé au pic de l'effort ($\dot{V}O_{2pic}$)) chez des femmes modérément actives (Devries et al. 2006). Les niveaux d'E2 plus élevés en phase lutéale pourraient favoriser le stockage et l'épargne du glycogène musculaire (Devries et al. 2006; Oosthuyse and Bosch 2010), et conduire à une plus grande mobilisation et utilisation des lipides pendant un exercice prolongé d'intensité modérée (Dombovy et al. 1987; Hackney 1999; Oosthuyse and Bosch 2010). Dans l'étude de Hackney et al., 9 femmes euménorrhées ont réalisé un exercice incrémental de 30 minutes sur tapis roulant (30%, 60% et 75% $\dot{V}O_{2max}$, 10 minutes par palier). Si l'oxydation glucidique en milieu de la phase folliculaire était supérieure à celle observée au milieu de la phase lutéale pour les intensités de 30% et 60% $\dot{V}O_{2max}$, de telles observations n'ont pas été rapportées à 75% $\dot{V}O_{2max}$ (Hackney et al. 1994). Ces résultats suggèrent qu'une intensité d'exercice élevée pourrait surpasser l'influence des hormones ovariennes sur le métabolisme des substrats énergétiques.

Toutefois, bien que certaines études aient mis en évidence une oxydation glucidique inférieure et lipidique supérieure en phase lutéale par rapport à la phase folliculaire dans le cadre d'exercices

sous maximaux (50 à 120 minutes sur ergocycle ou tapis roulant, $\leq 70\% \dot{V}O_{2max}$) (Hackney et al. 1991; Zderic et al. 2001; Campbell et al. 2001), d'autres ne soulèvent pas de différence significative entre les phases du cycle menstruel sur l'oxydation des substrats énergétiques pour des exercices de 45% à 80% $\dot{V}O_{2max}$ chez des femmes actives et sportives (60 à 90 minutes sur tapis roulant, ergocycle ou rameur) (De Souza et al. 1990; Horton et al. 2002; Suh et al. 2002; Vaiksaar et al. 2011a). Notamment, dans l'étude susmentionnée de Suh et al. conduite chez des femmes modérément actives (**Partie III.1.2**), la DEE, l'oxydation des substrats énergétiques (mesurée par calorimétrie indirecte), ainsi que les cinétiques d'apparition et de disparition du glucose et des lipides au cours de deux exercices sous maximaux (60 minutes de vélo à 45% et 65% $\dot{V}O_{2pic}$) étaient similaires entre les phases folliculaire (jours 3 à 9 du cycle) et lutéale (jours 17 à 25) (Suh et al. 2003). Ces observations sont en accord avec le résultat de la méta-analyse de D'Souza et al., selon laquelle il n'y aurait pas de différence significative de QR entre les phases folliculaire et lutéale du cycle menstruel en réponse à un exercice d'intensité modérée (au moins 5 minutes stables, $\leq 70\% \dot{V}O_{2pic}$) (SDM = 0,05 ; 95%IC = [-0,13 ; 0,23] ; p = 0,52) (D'Souza et al. 2023). Comme au repos (**Partie III.1.1**), les auteurs supposent que la disparité des résultats pourrait être expliquée par les différences méthodologiques entre les études, notamment dans la détermination et considération des phases et des sous-phases du cycle menstruel, mais aussi de la modalité (intensité, durée et nature) de l'exercice et de l'état nutritionnel des femmes suivies (à jeun, post-prandial) (Isacco and Boisseau 2023; D'Souza et al. 2023). Par ailleurs, l'influence des E2 et P4 sur le métabolisme énergétique pourrait être masqué par une variabilité inter-individuelle, mais également par les effets antagonistes des E2 et P4 sur l'utilisation des substrats énergétiques (D'Eon et al. 2002; Oosthuyse and Bosch 2010; Freemas et al. 2021; D'Souza et al. 2023). À cet égard, D'Eon et al. ont proposé qu'une réponse métabolique aux variations hormonales ovariennes pourrait être observée pour un ratio E2/P4 suffisamment élevé et une augmentation des taux d'E2 au moins deux fois supérieure entre les phases folliculaire et lutéale (D'Eon et al. 2002).

III.2 L'effet de la contraception hormonale sur le métabolisme énergétique de l'athlète féminine

III.2.1 Contraception hormonale et métabolisme énergétique au repos

Les hormones ovariennes exogènes peuvent avoir une affinité pour les récepteurs à l'E2 et la P4 supérieure à celle des hormones endogènes, amplifiant ainsi leurs effets physiologiques (Hirschberg 2022). Toutefois, leurs mécanismes d'action et leurs effets sur le métabolisme énergétique ne sont pas encore bien établis.

Dans une revue narrative, Metz et al. ont souligné qu'il n'existait pas de consensus concernant l'influence de l'utilisation d'une contraception orale sur la DER (Metz et al. 2022). Toutefois, que ce soit au niveau de la DER comme de l'utilisation des substrats énergétiques au repos, de nombreuses études semblent s'accorder sur une absence de différence significative entre les femmes HC+ et HC- actives et sportives (Eck et al. 1997; Jensen and Levine 1998; Devries et al. 2006; Isacco et al. 2012a; Ortega-Santos et al. 2018; Kuikman et al. 2024). Par exemple, Jensen & Levine n'ont observé aucune différence significative de la DER, des flux plasmatiques d'acides gras libres et du QR entre les femmes HC- (sans précision de la phase du cycle menstruel testée) et HC+ sous contraception orale combinée, suggérant que la prise de contraception orale n'aurait pas d'effet sur la lipolyse de la MG (Jensen and Levine 1998). De même, Isacco et al. ont observé des concentrations plasmatiques des substrats énergétiques (glucose, glycérol et acides gras libres) et des hormones (insuline, hormone de croissance, facteur de croissance 1 analogue à l'insuline et catécholamines) similaires entre 11 femmes modérément actives sous contraception orale combinée par rapport à 10 femmes HC-, au repos à jeun (Isacco et al. 2014). En revanche, les taux de peptides natriurétiques auriculaires étaient significativement plus élevés chez les femmes HC+. De précédentes études sur des modèles animaux ont mis en évidence que la combinaison de l'E2 et la P4 favoriserait la synthèse et l'expression génique du peptide natriurétique auriculaire (Hong et al. 1992; Belo et al. 2008). Ainsi, en raison des niveaux plus élevés et de l'activité biologique accrue des hormones sexuelles contenues dans les contraceptifs oraux (Hirschberg 2022), leur utilisation pourrait augmenter les concentrations plasmatiques de peptides natriurétiques auriculaires, favorisant une mobilisation des lipides plus importante *en* stimulant la lipolyse dans le tissu adipeux (Frühbeck et al. 2014).

Chez des rugbywomen de haut niveau, Kuikman et al. ont comparé le groupe de 11 athlètes HC- décrit en **Partie III.1.1** avec un groupe de 12 athlètes HC+ (n = 7 implant progestatif sous cutané, n = 4 contraception orale monophasique combinée, n = 1 injection progestative), testées à trois moments de leur contraception active séparés de 7 à 10 jours (Kuikman et al. 2024). La DER absolue et relative à la MNG étaient similaires entre les deux groupes et entre les différentes sessions chez les athlètes HC+. Ces résultats sont en accord avec les études comparant les femmes non-sportives HC- et HC+ utilisant une contraception orale combinée (Eck et al. 1997; Jensen and Levine 1998; Duhita et al. 2017, 2019) ou des injections de progestatif (médroxyprogestérone acétate) (Pelkman et al. 2001; Steward et al. 2016), tandis qu'aucune autre étude ne semble avoir étudié les effets de l'implant progestatif sur la DER (Kuikman et al. 2024). Toutefois, cette hétérogénéité du type de contraception hormonale utilisée contribue à une variabilité des profils hormonaux étudiés, ne permettant pas de tirer de conclusion certaine sur l'effet des contraceptions sur la DER chez des athlètes en haute charge d'entraînement.

Peu d'études semblent avoir comparé l'effet de la contraception hormonale sur la DER à l'échelle d'un cycle d'utilisation de la contraception chez des femmes actives et sportives. Dans leur étude, Löfberg et al. n'ont pas observé de différence de la DER, du QR, ou encore des taux de leptine, de ghréline acétylée et non-acétylée, et de T4 entre les phases inactives (jours 2 à 6 de la prise de placebo) et active (jours 2 à 9 de la pilule active) de l'utilisation de la contraception orale combinée chez 19 femmes modérément actives (Löfberg et al. 2024). Si un taux de T3 plus élevé en phase inactive de la contraception a été observé, celui-ci ne serait pas en accord avec de précédentes études suggérant un taux de T3 stable au cours de l'utilisation d'une contraception orale (Weeke and Hansen 1975; Ihalainen et al. 2021) et serait d'avantage induit par les variations individuelles du métabolisme thyroïdien (Löfberg et al. 2024). Ainsi, les variations en hormones exogènes contenues dans les contraceptions orales combinées ne seraient pas suffisamment importantes entre les phases actives et inactives de leur utilisation pour induire des modifications du métabolisme énergétique.

III.2.2 Contraception hormonale et métabolisme énergétique post-prandial

L'effet de la contraception hormonale sur la DEPP et l'utilisation des substrats en condition post-prandiale demeure sous-étudié (Duhita et al. 2017, 2019; Metz et al. 2022), et aucune étude ne cible spécifiquement la population sportive. Dans l'étude longitudinale de Suh et al., la DEPP et l'oxydation des lipides et glucides mesurées sur une période de 3 heures après l'ingestion d'un petit déjeuner standardisé riche en glucides (308 kcal ; 75% glucides, 16% protéines et 9% lipides) étaient similaires avant et après 4 mois d'utilisation de la contraception orale combinée, tout comme entre les périodes active et inactive de la contraception (Suh et al. 2003). En revanche, deux études transversales issues d'une même équipe de recherche ont mis en évidence une altération de la DEPP 3 heures après la prise d'un repas ayant des contenus protéiques différents entre des femmes HC- et HC+ utilisant une contraception orale monophasique (Duhita et al. 2017, 2019). Tandis que les femmes HC- ont présenté une augmentation significative de la DEPP en réponse à des repas riches en protéines (23%, 24% et 31% de l'apport énergétique) par rapport à un repas iso-calorique standard (11% de protéines), aucune modification n'a été observée chez les femmes HC+. Ainsi, l'utilisation d'une contraception orale pourrait réduire la flexibilité thermogénique induite par un repas riche en protéines, bien qu'aucun effet de la contraception orale n'ait été observé sur l'utilisation des substrats (Duhita et al. 2019). La population sportive consommant plus de protéines que la population générale (Tipton and Wolfe 2004), les athlètes féminines sous contraception orale pourraient davantage présenter de telles adaptations. Par ailleurs, Isacco et al. soulignent également l'importance de la prise en considération de l'état nutritionnel des femmes quant à l'influence du statut hormonal sur la

mobilisation des substrats énergétiques au repos (Isacco et al. 2014). En effet, des concentrations post-prandiales plus élevées de glycérol et d'acides gras libres ont été observées chez les femmes sous contraception orale minidosée monophasique, par rapport aux femmes HC- (testées entre les jours 18 et 22 de leur cycle menstruel) après un petit-déjeuner équilibré et calibré (10 kcal.kg⁻¹ ; 50% glucides, 35% lipides, 15% protéines), suggérant que la contraception orale induirait une mobilisation lipidique plus importante, sans information spécifique sur l'oxydation des substrats énergétiques dans cette étude (Isacco et al. 2014).

Ces observations suggèrent de considérer davantage l'interaction entre le statut hormonal et le statut nutritionnel sur les réponses du métabolisme post-prandial chez les athlètes féminines, pouvant impacter leur dépense d'énergie et la mobilisation des substrats. Ainsi, des recommandations spécifiques quant aux apports énergétiques et nutritionnels pourraient être pensés en fonction de leurs objectifs et périodes d'entraînements (haute/faible charge, récupération) chez les athlètes pour optimiser leur santé et leur performance.

III.2.3 Contraception hormonale et métabolisme énergétique à l'exercice

À l'exercice, plusieurs études ont observé que les hormones sexuelles synthétiques pourraient exercer une influence sur la mobilisation et l'utilisation des substrats énergétiques chez des femmes HC+ *versus* HC- actives ou entraînées. Dans l'étude de Bembem et al., les femmes sous contraception orale présentaient des niveaux de glucose inférieurs et des taux d'oxydation des glucides plus faibles par rapport aux femmes HC- lors d'une course de 90 minutes sur tapis roulant à 50% $\dot{V}O_{2max}$ (Bembem et al. 1992). Ces observations, en faveur d'une épargne des réserves de glycogène, pourraient retarder la perception de la fatigue au cours d'un effort prolongé (Romijn et al. 1993; Kelley 2005). Dans une majorité d'études réalisées dans le cadre d'un exercice prolongé d'intensité modérée (30 à 60 minutes, 40% à 65% $\dot{V}O_{2max}$), une mobilisation lipidique plus importante et une réduction des flux de glucose ont été rapportées chez des femmes utilisant des contraceptifs oraux comparativement à des femmes HC-, sans effet substantiel (ou détectable) sur l'utilisation des substrats énergétiques (Bonen et al. 1991; Casazza et al. 2004; Jacobs et al. 2005; Isacco et al. 2012b, 2014).

Cependant, Isacco et al. (**Partie III.2.2**) ont supposé que la mobilisation des lipides supérieure chez les femmes HC+ sous contraception orale par rapport aux femmes HC- pourrait être atténuée lorsque l'activité lipolytique est stimulée par l'exercice (45 minutes à 65% $\dot{V}O_{2max}$), indépendamment de son état nutritionnel (à jeun, post-prandial) (Isacco et al. 2014). Par ailleurs, dans la même cohorte, Isacco et al. ont observé que les femmes HC+ présentaient un taux d'oxydation lipidique maximal plus

élevé, pour une intensité relative d'exercice supérieure, par rapport aux femmes HC- (Isacco et al. 2015). Les activités des estrogènes naturels et synthétiques sont médiées par deux récepteurs majeurs : ER α et ER β , qui ont des effets opposés sur le métabolisme. L'activation d'ER α est associée à une meilleure tolérance au glucose, ainsi qu'à la mobilisation et à l'utilisation des lipides, tandis que la stimulation d'ER β favorise la lipogenèse et la résistance à l'insuline (Oosthuyse and Bosch 2012). L'éthinylestradiol se lie avec une haute affinité à ER α et avec une affinité deux fois plus faible à ER β , tandis que les œstrogènes naturels présentent des affinités de liaison comparables pour les deux récepteurs ER (Trémollières 2012). Les auteurs ont donc suggéré que la plus grande affinité de l'éthinylestradiol avec les récepteurs ER α comparativement à l'E2 pourrait expliquer ces résultats. Ainsi, la différence de l'oxydation des substrats énergétiques entre les femmes HC+ et HC- pourrait être dépendante de l'intensité de l'exercice, et il serait donc nécessaire d'individualiser les programmes d'entraînement, notamment en termes d'intensité, pour les athlètes souhaitant maximiser l'utilisation des lipides (Pérez-Martin et al. 2001; Achten et al. 2002).

La récente méta-analyse de D'Souza et al. n'a pas mis en évidence de différence significative du QR entre la phase active ou non active (placebo ou arrêt) de la contraception orale chez des femmes, actives ou non, lors d'un exercice modéré continu ($\leq 70\% \dot{V}O_{2pic}$) (SDM = 0,36 ; 95%IC = [-0,76 à 0,03] ; p = 0,07) (D'Souza et al. 2023). Toutefois, les études concernant l'influence des phases de la contraception (actives *versus* placebo) sur l'oxydation des substrats énergétiques sont rares (seulement 6 études incluses dans la méta-analyse) et sont centrées sur la contraception orale. De futures études sont donc nécessaires dans ce domaine tout en élargissant à différents types de contraception hormonale.

En accord avec ces résultats, Vaiksaar et al. ont comparé les phases de pilule active (jours 7 à 11 de l'utilisation de la pilule) *versus* placebo (jours 22 à 24 de l'utilisation de la pilule) chez des athlètes pratiquant de l'aviron sous contraception orale combinée monophasique (21 jours de pilule active, 7 jours de placebo) (Vaiksaar et al. 2011c). Aucune modification de la DEE, du QR, des taux d'utilisation des lipides et glucides, ni des niveaux de lactate n'ont été observés au cours d'un exercice prolongé d'aviron (60 minutes à $70\% \dot{V}O_{2max}$). Toutefois, les auteurs supposent que les mesures ont été réalisées trop tôt dans la période de prise de placebo, supposant que les niveaux d'E2 et P4 étaient encore bas, ce qui aurait limité l'observation de résultats significatifs. Mathy et al. ont étudié les réponses énergétiques au cours d'un exercice incrémental sur tapis-roulant (pente de 1%, début à $6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ avec un incrément de $0,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ toutes les minutes jusqu'à épuisement) chez 15 handballeuses de haut niveau en fonction de la phase de la prise de leur pilule (active (jours 16 à 17) *versus* placebo (jours 2

à 3)) (Mathy et al. 2024). Outre une légère diminution significative de la $\dot{V}O_{2pic}$ absolue et relative au poids, aucune modification de la DEE et de l'oxydation des substrats énergétiques n'a été observée entre les deux conditions, que ce soit à l'effort sous-maximal ou maximal. En revanche, chez des femmes sous contraception orale et entraînées à différents niveaux (modéré à élevé, sans précision du type de sport pratiqué), Mattu et al. ont observé une meilleure utilisation des lipides lors de la phase active par rapport à la phase placebo en réponse à un exercice incrémental sous-maximal (6 minutes par palier de 20 à 80 watts à 70 tours par minute) et maximal (début à 50 watts avec un incrément de 25 watts par minute jusqu'à épuisement) sur ergocycle (Mattu et al. 2020). Les résultats discordants pourraient s'expliquer, en partie, par des différences concernant la modalité d'exercice (cyclisme, course à pied, aviron), la durée et l'intensité de l'exercice, ainsi que par le niveau de condition physique et cardiorespiratoire des athlètes (Mathy et al. 2024). Par conséquent, il n'y aurait, à l'heure actuelle, aucun consensus concernant l'effet de la phase de la prise d'une contraception orale sur le métabolisme énergétique à l'exercice prolongé, quelle que soit son intensité chez des athlètes.

L'influence de la contraception orale progestative sur le métabolisme à l'exercice semble peu étudiée dans la littérature et ne semble pas avoir été explorée chez des athlètes. Chez des femmes sédentaires, Redman et al. ont mis en évidence une oxydation des lipides au cours d'un exercice prolongé sur ergocycle (20 minutes à 75% $\dot{V}O_{2max}$) plus importante chez des femmes utilisant une contraception orale combinée avec de hautes doses de progestatifs (1000 μ g noréthistérone) comparativement à celles avec des doses moins importantes (500 μ g noréthistérone) (Redman et al. 2005). Bien que l'effet combiné avec l'éthinylestradiol ne puisse pas être ignoré, les auteurs ont suggéré que les concentrations élevées de progestatifs contenus dans les contraceptifs oraux pourraient être associées à une intolérance au glucose, à une résistance à l'insuline et à une réduction de l'utilisation du glycogène musculaire, favorisant ainsi l'utilisation des lipides (Sutter-Dub et Vergnaud 1982; Picard et al. 2002; Campbell et Febbraio 2002). Ainsi, tout comme la question de l'interaction entre l'E2 et la P4, le rapport entre les estrogènes synthétiques et les progestatifs dans le cadre de l'utilisation d'une contraception hormonale combinée pourrait également jouer un rôle important dans la sélection des substrats énergétique à l'exercice (Constantini et al. 2005; D'Souza et al. 2023). Par ailleurs, bien que la contraception orale combinée soit la plus utilisée, les effets d'autres types de contraceptifs sur le métabolisme énergétique, tels que les implants, injections, patches, ou stérilets hormonaux, demeurent sous-étudiés.

POINTS CLÉS

- Une influence des hormones ovariennes sur le métabolisme énergétique a été démontrée chez les modèles animaux et humains : **l'E2 facilite la mobilisation et l'utilisation des lipides** au repos et lors d'exercices prolongés d'intensité modérée, tandis que la **P4 favorise l'utilisation des glucides** par son action antagoniste à l'E2 sur le métabolisme énergétique.
- **Aucun consensus** n'a été établi quant à l'influence du statut hormonal ovarien (selon les phases du cycle menstruel ou l'utilisation d'une contraception hormonale) sur la dépense d'énergie et l'utilisation des substrats énergétiques chez la femme, que ce soit au repos à jeun, en condition post-prandiale ou à l'exercice.
- Les conclusions restent limitées en raison de **l'hétérogénéité méthodologique** des études, incluant des facteurs tels que : la taille d'échantillon, la définition du cycle menstruel, les méthodes de détermination des phases du cycle menstruel, le type de contraception hormonale et la nature des hormones synthétiques, ainsi que la modalité de l'exercice réalisé (type, durée, intensité).
- Le caractère **multifactoriel** des adaptations métaboliques nécessite la prise en compte de **facteurs extrinsèques** à l'étude, tels que les variabilités intra- et inter-individuelles, le niveau d'activité physique ou encore l'état nutritionnel des femmes.
- Il existe actuellement très peu d'études réalisées chez les athlètes féminines. Il semblerait que le **statut hormonal ovarien n'ait pas d'effet significatif sur la dépense d'énergie et l'utilisation des substrats énergétiques** au repos ou lors d'exercices d'intensité modérée dans cette population, mais les limites méthodologiques ne permettent pas de tirer de conclusions certaines.
- Aucune étude ne semble avoir examiné l'effet de l'interaction entre la **charge d'entraînement** (qui varie au cours d'une saison sportive) et le **statut hormonal ovarien** sur le métabolisme énergétique dans les **trois compartiments de la dépense d'énergie**.

OBJECTIFS DU PROJET DE THÈSE, ÉTUDES ET HYPOTHÈSES ASSOCIÉES

Au regard de l'ensemble de cette littérature et des préoccupations du laboratoire AME2P, l'objectif général de ce travail de thèse a été construit.

Objectif général : Étudier les adaptations énergétiques aux variations de poids et au statut hormonal ovarien chez les athlètes.

Comme soulevé dans la revue de littérature, les athlètes peuvent être engagés dans des cycles de pertes et de reprises de poids successifs (c'est-à-dire « *weight cycling* ») pour des objectifs de performance. Bien qu'il ait été montré que les variations de poids puissent engendrer des adaptations métaboliques et nutritionnelles majeures à court et long terme dans la population générale, cette question reste en suspens chez les athlètes. Pourtant, le haut niveau de pratique physique chronique, les méthodes de perte (parfois extrêmes) et reprise de poids utilisées, ainsi que la recherche d'un maintien de la MNG pourraient interférer dans ces adaptations. De plus, le type de sport pratiqué, mais aussi le sexe des athlètes, pourraient influencer ces réponses métaboliques et nutritionnelles. De ce fait, le premier axe de ce travail de recherche, composé de trois études, a été élaboré (**Figure 17**).

Axe 1 : Adaptations métaboliques et nutritionnelles aux variations de poids chez les athlètes habitués au « *weight cycling* ». L'étude WAVE.

L'étude WAVE a pour objectif principal d'étudier les adaptations métaboliques et nutritionnelles à un épisode de perte et reprise de poids chez des athlètes habitués au « *weight cycling* », et dans un second temps, de distinguer s'il existe des différences selon le type de sport pratiqué et le sexe des athlètes.

Hypothèses par étude :

H1 : En période de stabilité pondérale, les athlètes habitués à des pertes de poids importantes pourraient présenter un poids et un taux de MG plus élevés que ceux ayant l'habitude de perdre moins de poids. De plus, ils pourraient manifester une restriction cognitive plus prononcée et adopter des habitudes alimentaires plus strictes.

*H2 : Au cours du cycle complet de « *weight cycling* », nous formulons l'hypothèse d'une perte de MG accompagnée d'un maintien de la MNG pendant la phase de perte de poids, suivie d'une reprise de MG sans « *fat overshoot* » lors de la reprise de poids. La dépense énergétique, tant au repos qu'à l'exercice, ne sera pas modifiée, bien qu'une augmentation temporaire de l'utilisation des lipides et une réduction de celle des glucides pourraient être observées en réponse à la perte de poids, avant de revenir aux valeurs initiales après la reprise de poids.*

H3 : Le profil nutritionnel des athlètes sera altéré en réponse à la perte de poids, et une suralimentation pourra être attendue à l'issue de la reprise de poids.

Malgré un intérêt scientifique exponentiel pour le sport féminin depuis ces 10 dernières années, la qualité des études s'étant intéressées à l'influence du statut hormonal ovarien sur la physiologie de l'athlète féminine reste faible et les résultats contradictoires, mettant en exergue un manque d'outils et d'approche méthodologique validés et communs. Bien que certains experts scientifiques de ce domaine aient proposé des recommandations pour la réalisation d'études de haute qualité chez les athlètes féminines, celles-ci semblent difficilement applicables une fois confrontées à la réalité du terrain. Compte tenu de ces difficultés, un objectif spécifique composé de deux études a été mis en place (**Figure 17**).

Axe 2 : Considérations méthodologiques spécifiques aux travaux de recherche chez la femme.

L'objectif de cet axe spécifique est d'identifier les difficultés méthodologiques rencontrées dans les études portant sur le statut hormonal ovarien et de les prendre en considération pour proposer des alternatives adaptées.

Hypothèses par étude :

H1 : Le questionnaire développé permettra d'apporter une meilleure caractérisation et compréhension du statut hormonal ovarien et des symptômes associés, ainsi que de la gestion du poids des athlètes féminines.

H2 : La qualité méthodologiques des explorations conduites chez des participantes HC+ est plus élevée que chez les participants HC- dans le domaine du métabolisme énergétique à l'exercice.

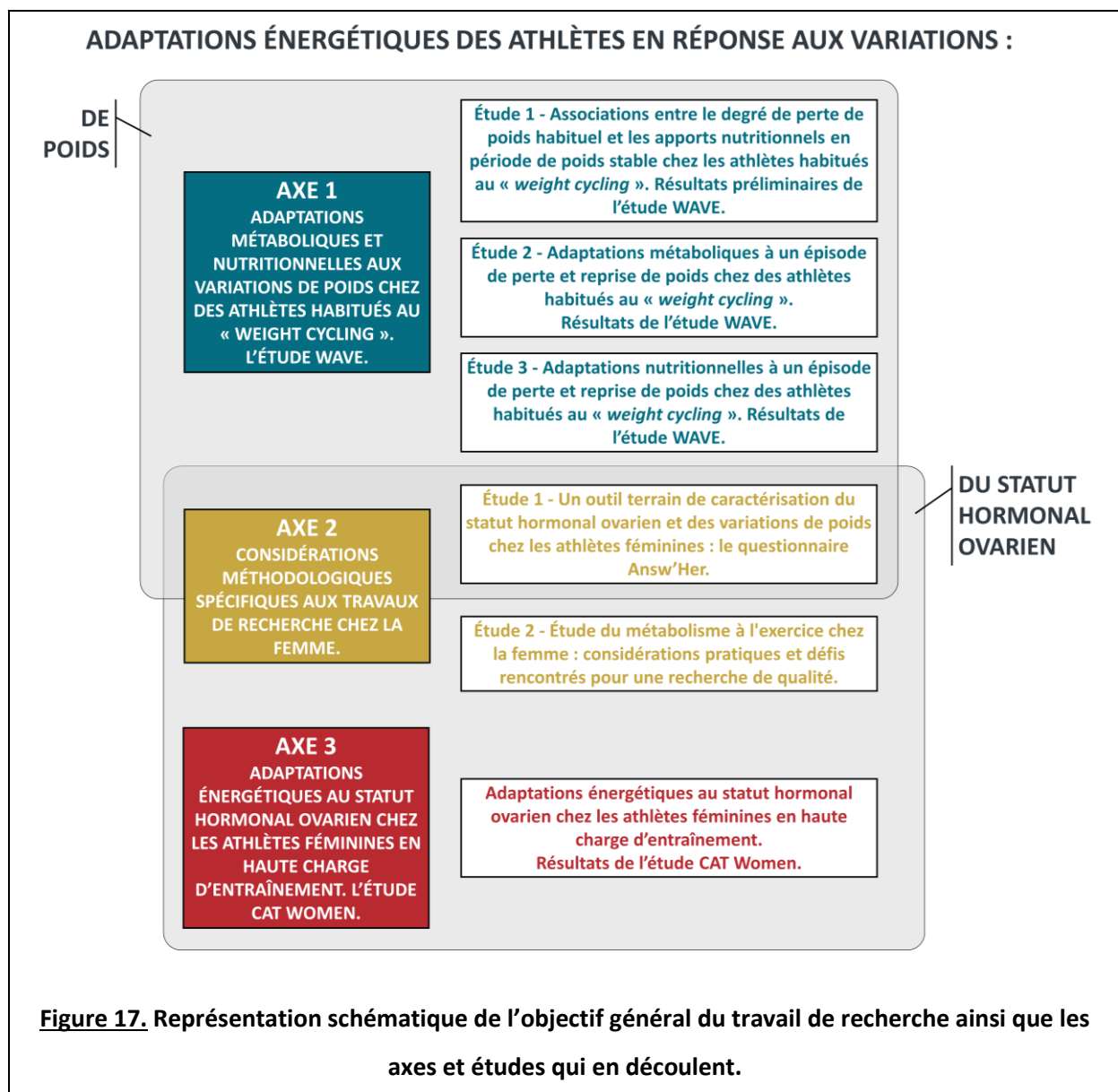
En plus des adaptations induites par la pratique sportive, les variations hormonales ovariennes peuvent également modifier le métabolisme énergétique chez les athlètes féminines (thermorégulation, dépense d'énergie, mobilisation et utilisation des substrats énergétiques) qui peut entraîner des répercussions à la fois sur leur santé physique et mentale, et donc leur performance. Toutefois, la majorité des études semble s'être focalisée sur les aptitudes physiques en lien avec la performance à l'exercice (capacité aérobie maximale, seuil de fatigue, fonction musculaire), et ce, sans s'intéresser aux déterminants métaboliques chez les athlètes féminines. De plus, il existe un réel manque de prise en considération de la charge d'entraînement des athlètes, pourtant variable et déterminante au cours de la saison sportive et pouvant interférer dans ces adaptations. Ainsi, ces observations ont conduit à la structuration du troisième axe de ce projet de thèse, composée d'une étude (**Figure 17**).

Axe 3 : Adaptations énergétiques au statut hormonal ovarien chez les athlètes féminines en haute charge d'entraînement. L'étude CAT Women.

L'objectif de l'étude CAT Women est de déterminer l'influence du statut hormonal ovarien (phases folliculaire et lutéale du cycle menstruel, contraception hormonale) sur le métabolisme énergétique d'athlètes féminines de bon et haut niveau en période de haute charge d'entraînement.

Hypothèses de l'étude :

La dépense d'énergie et l'utilisation des substrats au repos, à l'exercice et en condition post-prandiale ne différeront pas en fonction du statut hormonal ovarien des athlètes en période de haute charge d'entraînement.



AXE I

—

**ADAPTATIONS MÉTABOLIQUES ET
NUTRITIONNELLES AUX VARIATIONS DE
POIDS CHEZ DES ATHLÈTES HABITUÉS AU
« *WEIGHT CYCLING* ».
L'ÉTUDE WAVE**

Méthodologie générale de l'étude WAVE

I. Participants

Des athlètes féminins et masculins pratiquant un sport de combat, de force ou d'endurance, habitués au « *weight cycling* » depuis au moins 2 ans ont été inclus dans l'étude WAVE. Ces derniers devaient respecter les critères d'inclusion suivants : i) sujet sain âgé de 18 à 40 ans (bornes inclusives), ii) exerçant au moins 4 séances d'activités sportives d'endurance ou à catégories de poids par semaine dans un objectif de performance, iii) ayant l'habitude de réaliser des variations de leur poids corporel d'au moins 3% dans le cas des sports à catégories de poids ou 1,5% dans le cas des sports d'endurance, au cours des 2 dernières saisons sportives (une saison sportive correspond à une année au cours de laquelle alternent des périodes d'entraînement, de récupération et les participations aux compétitions officielles) et iv) les femmes utilisant une contraception hormonale au cours des 6 derniers mois, ou ayant des cycles menstruels naturels réguliers au cours des 6 derniers mois.

L'étude a été conduite en accord avec la déclaration de Helsinki. Tous les volontaires ont reçu une notice d'information et ont signé le formulaire de consentement avant le début de l'étude. Le protocole de l'étude WAVE a été approuvé par le comité d'éthique local Nord-Ouest III (2019-A00699-48) et a été enregistré comme étude clinique sur clinicaltrials.gov (NCT04107545).

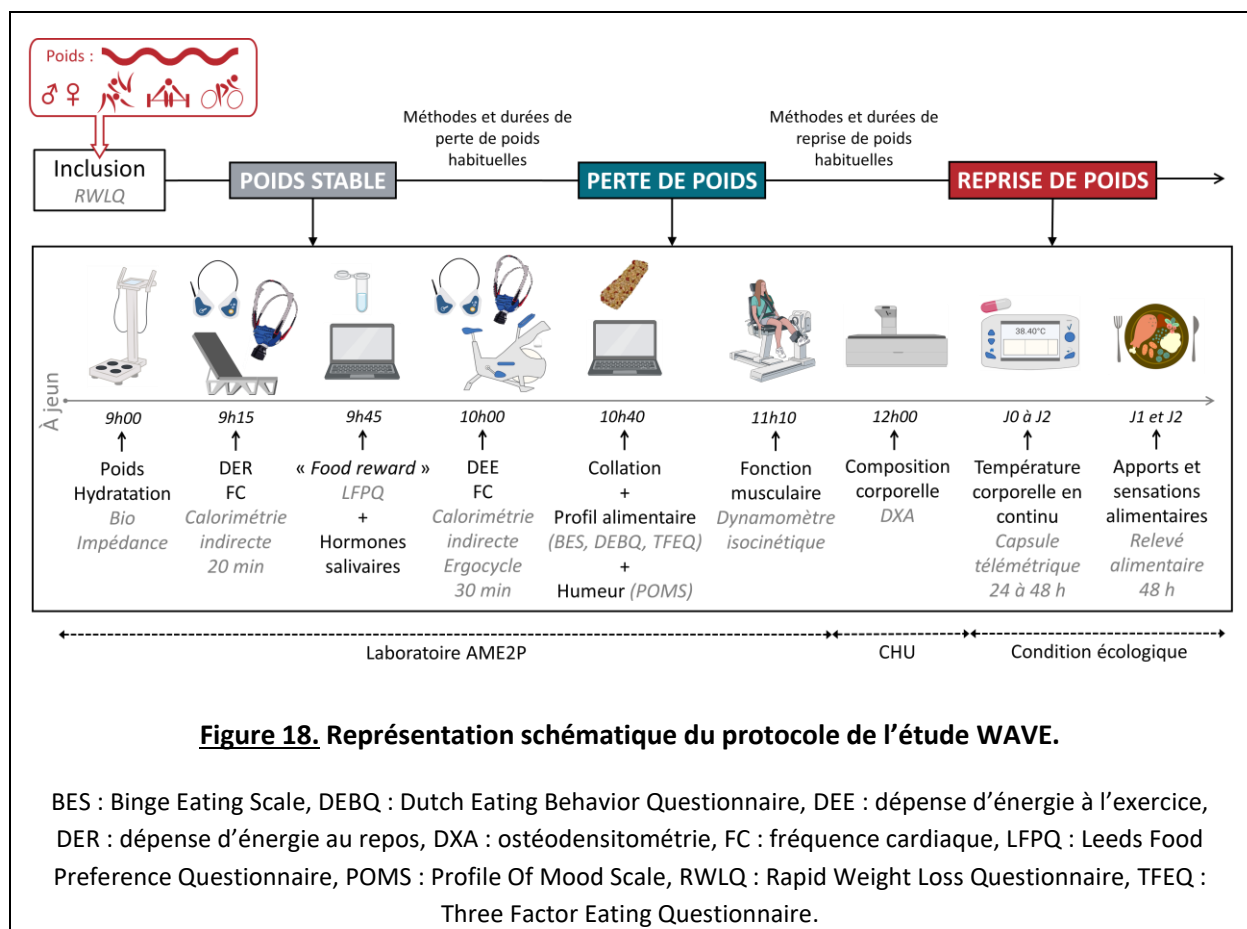
II. Protocole expérimental de l'étude WAVE

Bien que la méthodologie spécifique à chaque étude soit détaillée dans les articles associés, une description générale du protocole est proposée ci-dessous.

Après une visite d'inclusion, les participants se sont rendus au laboratoire à trois reprises pour effectuer une visite expérimentale en matinée, dans trois conditions distinctes : i) pendant une période de poids stable (c'est-à-dire que les athlètes ne subissaient ni perte ni reprise de poids et avaient maintenu un poids stable au cours des trois dernières semaines) (CON), ii) à la fin de leur phase habituelle de perte de poids (WL), et iii) à la fin de la reprise de poids (c'est-à-dire après une dynamique de reprise de poids, non stabilisée depuis plus d'une semaine) (WG). L'épisode de perte et de reprise de poids devait refléter les degrés, durées, et stratégies habituelles des athlètes afin de rester fidèle à leurs pratiques réelles.

Les participants tenaient régulièrement l'investigateur informé de leur poids, mesuré chaque matin au réveil, à jeun et après avoir vidé la vessie. Les trois visites se déroulaient de manière similaire, chaque matinée. Les participants arrivaient au laboratoire à 9h00, après un jeûne de 12 heures, pour

entamer une série de mesures illustrée en **Figure 18**. Dans le cadre de ce projet de thèse, une attention particulière a été portée aux résultats des mesures suivantes : poids et composition corporelle, métabolisme énergétique et fréquence cardiaque au repos et lors d'un exercice à l'ergocycle d'intensité modérée (50 % de la fréquence cardiaque maximale théorique) à jeun, ainsi que préférences et comportements alimentaires. À la fin de chaque matinée, les participants ingéraient une capsule télémetrique mesurant en continu la température corporelle et remplissaient un relevé alimentaire pour les deux jours suivants. Durant ces deux jours, il leur était demandé de conserver leurs habitudes de vie en accord avec la condition de la visite effectuée (poids stable, perte de poids, ou reprise de poids). Les méthodes correspondant aux résultats présentés dans les études seront détaillées dans celles-ci.



III. Travaux de thèse issus de l'étude WAVE

Afin de répondre aux objectifs de cette thèse, une partie des mesures de l'étude WAVE a été exploitée. Trois études basées sur l'analyse des données métaboliques et nutritionnelles ont été réalisées et seront présentées dans la suite de ce manuscrit.

Étude 1 : Associations entre le degré de perte de poids habituel et les apports nutritionnels en période de poids stable chez les athlètes habitués au « *weight cycling* ». Résultats préliminaires de l'étude WAVE.

Étude 2 : Adaptations métaboliques à un épisode de perte et reprise de poids chez des athlètes habitués au « *weight cycling* ». Résultats de l'étude WAVE.

Étude 3 : Adaptations nutritionnelles à un épisode de perte et reprise de poids chez des athlètes habitués au « *weight cycling* ». Résultats de l'étude WAVE.

ÉTUDE 1

Associations entre le degré de perte de poids habituel et les apports nutritionnels en période de poids stable chez les athlètes habitués au « *weight cycling* ».
Résultats préliminaires de l'étude WAVE

Publiée dans Nutrition Research, 2024

doi : 10.1016/j.nutres.2024.07.009

**THE HABITUAL DEGREE OF WEIGHT LOSS MIGHT BE ASSOCIATED WITH SPECIFIC FAT AND
PROTEIN INTAKES DURING A PERIOD OF WEIGHT MAINTENANCE IN ATHLETES USED TO
WEIGHT VARIATIONS:
PRELIMINARY RESULTS FROM THE WAVE STUDY.**

Running title: Degree of weight loss, body composition and nutrient intake.

Sarah Bagot^{1,2*}, Bruno Pereira³, Jennifer Miles-Chan⁴, Céline Gryson², Emilie Chanséaume Bussière²,
Martine Duclos^{5,6}, David Thivel^{1,6}, Laurie Isacco^{1,6}

1. Clermont Auvergne University, UPR 3533, Laboratory of the Metabolic Adaptations to Exercise under Physiological and Pathological Conditions (AME2P), CRNH Auvergne, Clermont-Ferrand, France. sarah.bagot@uca.fr; david.thivel@uca.fr; laurie.isacco@uca.fr.

2. Nutrifizz, 63000 Clermont-Ferrand, France. Celine@nutrifizz.fr; emilie.cb@nutrifizz.fr.

3. Clermont-Ferrand University Hospital, Biostatistics Unit (DRCI), Clermont-Ferrand, France. bpereira@chu-clermontferrand.fr.

4. Human Nutrition Unit, School of Biological Sciences, University of Auckland, Auckland 1024, New Zealand. j.miles-chan@auckland.ac.nz.

5. Department of Sport Medicine and Functional Explorations, CHU Clermont-Ferrand, Clermont-Ferrand, France. mduclos@chu-clermontferrand.fr.

6. International Research Chair Health in Motion, Clermont Auvergne University Foundation, Clermont-Ferrand, France.

***Corresponding author:** Sarah BAGOT, Clermont Auvergne University, UPR 3533, Laboratory of the Metabolic Adaptations to Exercise under Physiological and Pathological Conditions (AME2P), CRNH Auvergne, Clermont-Ferrand, France. sarah.bagot@uca.fr.

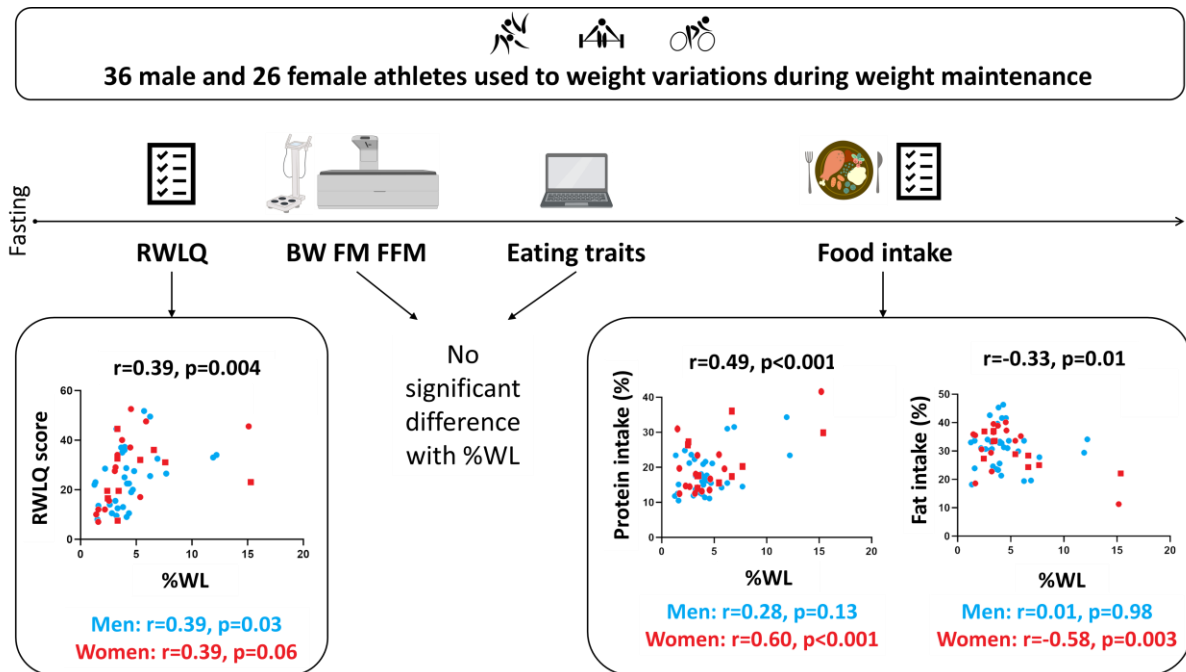
ABSTRACT

Weight variations are common in sporting life, with important inter-individual variability in the degree of an athlete's habitual weight loss. As a part of the WAVE study (NCT04107545), the main objective of this preliminary study was to determine whether the habitual degree of weight loss was associated with anthropometric, body composition, nutritional or psychometric profiles during a period of weight maintenance in athletes accustomed to weight variations. We hypothesized that athletes accustomed to a higher habitual degree of weight loss may have a higher body weight and body fat mass, and may present a more controlled diet regimen and cognitive restriction than athletes with a lower habitual degree of weight loss. During a period of weight maintenance, 62 athletes (24.0 ± 5.3 y; 26 women) completed anthropometry and body composition measurements, a 48-h food diary and self-reported questionnaires to determine their weight variation practice, nutritional profile and mood state. Athletes were stratified within inter- and intra-quartile groups according to their habitual degree of weight loss. Athletes with a higher habitual degree of weight loss were those who consumed more protein ($p < 0.001$) and less fat ($p = 0.01$) as a proportion of total energy compared with those losing less weight, without any difference in body composition between the groups. The rapid weight loss score was significantly higher in individuals losing more weight ($p < 0.001$) and no difference was observed for the mood state profile. The present results suggest a potential control of nutritional regulation during a period of weight maintenance in order to spare fat-free mass and favor fat mass loss in athletes who are routinely losing more weight. Fat-free mass may be the main nutritional driver due to low body fat mass in athletes, which may limit the "catch-up fat" phenomenon commonly observed in nonathletic population.

Keywords: Athletes, weight variations, nutrient intake, body composition, diet.

Abbreviations: BES: Binge Eating Scale, BMI: body mass index, CHO: carbohydrates, DEBQ: Dutch Eating Behavior Questionnaire, DXA: dual energy X-ray absorptiometry, EI: energy intake, FFM: fat-free mass, FM: fat mass, HC: hormonal contraceptive, HC-: non-hormonal contraceptive users, HC+: hormonal contraceptive users, LFPQ: Leeds Food Preference Questionnaire, POMS: Profile of Mood States questionnaire, RWLQ: Rapid Weight Loss Questionnaire, TFEQ: Three-Factor Eating Questionnaire.

GRAPHICAL ABSTRACT



Athletes used to weight variations (N=62) were enrolled in a stable body weight period for physical and psychological measurements. The habitual degree of weight loss does not seem associated with body weight or composition nor the profile of mood state and food preferences. However, athletes used to a higher degree of weight loss consumed more relative protein and less relative fat than those losing less weight. This may suggest potential conscious control of nutritional regulation in order to spare fat-free mass and favor fat mass loss in those athletes losing more weight. %WL: usual degree of weight loss, BW: body weight, FFM: fat-free mass, FM: fat mass, RWLQ = Rapid Weight Loss Questionnaire.

HIGHLIGHTS

- Fat mass during weight maintenance is independent of usual weight loss in athletes.
- Athletes used to a higher degree of weight loss consumed more protein and less fat.
- Athletes with a higher degree of weight loss seem to favor fat-free mass sparing.
- Sex influences the negative relationship between fat intake and usual weight loss.
- Food reward is not altered in athletes used to higher degrees of weight variations.

1. INTRODUCTION

Repeated weight variations over time, known as “weight cycling”, may lead to body weight and fat mass gain, as well as to adverse cardiometabolic complications [1,2]. Interestingly, robust emerging evidence indicates that these adverse complications might be more pronounced in individuals with normal weight prior to weight variations [3]. In a tightly-controlled study of 4 129 Finnish twins, Pietiläinen et al. examined the association between body mass index (BMI) evolution (from 16 to 25 year) and lifetime number of intentional weight loss episodes (> 5 kg) at 25 years of age [4]. They observed that the lower the initial BMI and the greater the number of intentional weight loss episodes, the higher the increase in BMI from 16 to 25 years. The authors thus highlighted an interaction between the number of intentional weight loss episodes and initial BMI as a strong predictor of weight gain from adolescence to young adulthood in individuals with normal-weight, independent of genetic factors. In addition, it has been suggested that the leaner the individual initially, the higher the fat-free mass (FFM) loss during weight loss, and the higher risk of developing cardiometabolic comorbidities with subsequent weight variations [5,6]. These results have been recently supported by a systematic review and meta-analysis showing a higher average body weight in habitual dieters than non-dieters, with 75% of the included interventional studies demonstrating metabolic adaptations after weight loss that favored weight regain [7].

Athletes represent a particular group of normal-weight individuals exposed to regular dieting processes, and then weight variations, characterized by an important inter-individual variability, notably in terms of the degree and duration of weight loss and the methods used to achieve it [8,9]. Since acute and/or chronic energy restriction, leading to low energy availability, are common features throughout athletes’ sporting seasons and careers [3,8–11], commonly involving the use of aggressive dietary methods and/or high levels of physical activity, it may be questioned whether weight variations in athletes is associated with similar health outcomes to those seen in the general population [2].

While evidence remains inconclusive regarding the potential relationship between weight variations during a sport career and increased BMI or adverse cardiometabolic profiles post-career [12–14], Miles-Chan & Isacco hypothesized that a high physical activity level, associated with greater FFM preservation during weight loss as a result, may protect athletes against these potential negative consequences of weight variations. This has been recently supported in a systematic review and meta-analysis failing to observe any subsequent excess weight or fat mass (FM) regain (*i.e.*, weight/fat overshoot), regardless of the type of sport (*i.e.*, combat, strength and fitness sports) or method used for weight loss [8]. These reviews however point to the lack of well-controlled studies in athletes and contradictory evidence observed in military soldiers, whose physical and dietary profiles remain close to athletes, showing that initially leaner individuals are found to demonstrate a greater subsequent fat

overshoot during recovery from an energy deficit [15–17]. Moreover, athletes have been shown to exhibit more pronounced restriction related to nutritional regulation, with a higher prevalence of eating disorders compared to the general population [18].

Although it remains necessary to directly observe associations between weight variations and health-related risks in athletes, some studies suggest that their general characteristics or profile as well as the nature of their weight variation practices might be implicated (*e.g.*, weight variation history, methods used, habitual rate and/or degree of weight loss *etc.*). For instance, Artioli et al. found that while the level of aggressiveness of weight loss methods was not influenced by weight class or gender, the competitive level and age at which athletes began cutting weight were of importance [10]. Similarly, Pélissier et al., noted that the younger the athletes started losing weight, the higher the weight loss aggressiveness score, potentially leading to a higher number of weight cycles over their sporting career [19]. The authors thus speculated on a potential long-term risk for weight/FM gain and associated comorbidities after the sport career was over. In addition, the authors also observed a relationship between the athletes' initial body weight and their weight regain following weight loss, with greater weight regain in lighter athletes, which may be related to “short term strategies” such as dehydration/rehydration [19]. In a recent systematic review, Lakicevic et al. showed that mood states in combat athletes were aggravated when rapid weight loss of $\geq 5\%$ was performed, without any sexual dimorphism observed [20]. Overall, it may be speculated that those starting to cut weight at an earlier age will repeat more weight cycles and need to engage in increasingly aggressive methods to reach the target weight because of resulting metabolic adaptations. As such, the initial age and the degree of weight loss may be of importance to discriminate athletes at highest risk. Additionally, to our knowledge, no study has yet considered biological sex as an independent variable capable of modulating these relationships, or contraceptive hormonal profiles in women [21,22], despite potential discrepancies in terms of body composition, nutritional profile or metabolic adaptations as a function of the habitual degree of weight loss (absolute or relative) between men and women or between women using hormonal contraceptives or not.

Therefore, as a part of a larger study, the main objective of this preliminary study was to determine whether the habitual percentage of weight lost in athletes accustomed to weight variations is associated with anthropometry, body composition, dietary behaviors or mood profile during a period of weight maintenance, to potentially decipher those at risk; and secondly, to determine these potential relationships in men and women independently. We hypothesized that athletes accustomed to greater weight loss as a percentage of initial body weight may have a higher body weight and body fat mass during a period of weight maintenance, and may present with higher cognitive restrictiveness and more restricted dietary patterns than athletes with lower weight loss.

2. METHODS

This preliminary study is part of a larger project entitled “The WAVE study”, investigating physiological adaptations to an entire weight loss and weight regain cycle in weight cycling athletes from endurance and weight category sports, using their habitual methods. These involved measurements of body weight and composition (*e.g.*, fat mass, fat-free mass, total body water), metabolic responses (energy expenditure and substrate oxidation at rest and during moderate intensity exercise), dietary profile and appetitive responses as well as endurance and strength performance. The WAVE study protocol has been registered (NCT04107545).

2.1. Participants

A total of 62 healthy athletes (24.0 ± 5.3 years; 26 women and 11 were using hormonal contraceptives) practicing 10.9 ± 4.4 hours per week of endurance or weight-class sports (*i.e.*, combat or strength sports) and accustomed to weight variations were included in the present study. The participants were recruited using advertisements in social media, local endurance and weight-class sport facilities and through university mailing lists. To be recruited, the athletes had to i) be aged 18-35 years, ii) be healthy (*i.e.*, no chronic disease), iii) not be pregnant or breastfeeding, iv) be able to understand and complete the questionnaires, iii) have practiced endurance or weight class sports for at least 5 hours a week for at least the last 5 years, and competing at regional or national level, iv) have undertaken weight variations to achieve performance objectives for at least the last 2 years. Athletes were excluded if i) they were pregnant, ii) they did not complete the questionnaires. A weight variation was defined as successive episodes of body weight loss and regain to achieve performance objectives over a period of at least 2 years. Performance objectives included voluntary weight loss in order to enter a specific body weight category for weight-class sports, or for body weight to power ratio optimization in endurance sports.

This experiment was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki, and written informed consent was obtained from all participants prior to their involvement. The study protocol was approved by the relevant ethical authorities (2019-A00699-48).

2.2. Experimental design

After a screening visit, each athlete attended the laboratory for an experimental visit during a period outside any competitive phase of their season and of weight maintenance as confirmed by self-report (*i.e.*, not actively engaged in weight loss or weight (re)gain, and with a weight stable for at least 3 weeks (according to the individual and habitual percentage of weight loss of each athlete)), and they did not

have to modify their physical training or dietary habits during the whole duration of the protocol. Athletes arrived at the laboratory in the morning after, at least, a 10-hour overnight fast, whereupon they were asked to undergo anthropometric and body composition measurements and complete questionnaires related to their weight variation practices, nutritional profile and mood. Questionnaires were completed on a dedicated tablet while seated in a comfortable armchair in a calm room, with the following sequence observed for each athlete with a ~5 min break between each assessment to avoid fatigue: Rapid Weight Loss Questionnaire (RWLQ), Leeds Food Preference questionnaire (LFPQ), Three-Factor Eating questionnaire (TFEQ), Binge Eating Scale (BES), Dutch Eating Behavior Questionnaire (DEBQ), and Profile of Mood States questionnaire (POMS). A research team member was available in the room to help if needed. Before leaving the laboratory, each athlete was given a hard-copy 48-h food diary to complete over the following two days, which was to be representative of their eating habits during a weight maintenance period as explained by the research team member.

2.2.1. Hormonal contraceptive use in women

During the screening visit, women were questioned about their hormonal contraceptive (HC) habits. Women were considered as non-hormonal contraceptive users (HC-) if they weren't using any form of hormonal contraceptive (*i.e.*, hormonal intrauterine device or implants or hormonal patch or vaginal ring or contraceptive pill) for at least the last year. Conversely, women using hormonal contraceptive for at least one year was considered as hormonal contraceptive users (HC+).

2.2.2. Anthropometry and body composition

Fasting body weight and height were measured to the nearest 0.1 kg with a digital scale and to the nearest 0.1 cm using a wall-mounted stadiometer, respectively. Body mass index was calculated as body weight (kg) divided by height squared (m^2). Body composition (*i.e.*, FM, FFM) was determined using dual x-ray absorptiometry (DXA, QDR4500A scanner, Hologic, software version APEX 3.3.0.1, Waltham, MA, USA), while total body water (kg and % of total body weight), corresponding to intra and extra cellular body water, was determined via bioelectrical impedance (Tanita MC-780 Tanita Corporation, Tokyo, Japan). Then, total body water/body weight and total body water/FFM ratios were calculated.

2.2.3. Rapid weight loss questionnaire

Athletes completed the self-reported RWLQ developed by Artioli et al. [23] and validated in French by Pélissier et al. [19]. This questionnaire is comprised of 21 items relating to general athlete information, competitive level, body weight and diet history, weight loss behaviors (*i.e.*, usual weight loss before

competitions, duration of weight loss, methods used, etc.), the influence of other persons on their weight loss practice, and the frequency of methods used to lose weight. Athletes had to respond according to their personal weight loss habits. An individual score is assigned to all questions commensurate with weight loss behaviors and a total score (*i.e.*, RWL score), reflecting the level of harm and aggressiveness of pre-competitive weight management, is obtained. The higher the score, the more aggressive and harmful the weight management strategy is. The habitual degree of weight loss of the athletes was calculated in absolute and percentage values (*i.e.*, “How much do you weight?” and “How much weight do they usually cut before competitions?”).

2.2.4. Leeds Food Preference questionnaire

The French version of the LFPQ, developed by Finlayson et al. [24] and validated by Thivel et al. [25] was used to assess food preference and reward according to different food categories (high/low fat and high/low sweet taste). Briefly, athletes were asked a series of questions regarding their food preferences during a 10-minute computer task under fasted conditions. Explicit liking was measured using a 100-mm visual analog scale to estimate how much each individual would like to eat or taste the presented foods. Implicit wanting was measured by using a forced-choice task where preferred foods were spontaneously selected from pictorial food items. Implicit wanting was assessed based on the athlete’s food category choice and non-choice, and their reaction time to respond. An implicit wanting score ranges between –100 and 100 and is interpreted in relation to the scores of the other food categories evaluated in the task. A positive score indicates that the considered food category (high/low fat, high/low taste) was chosen more often and faster than the others. A negative score indicates the opposite.

2.2.5. Three-Factor Eating Questionnaire

The French version of the 21-item TFEQ was used to assess eating behavior traits [26]. This questionnaire covers the three following aspects of eating behavior: overall cognitive restraint (6 items), emotional eating (6 items), and uncontrolled eating (9 items). Each item is assessed on a four-point scale (1—definitely true; 2—mostly true; 3—mostly false; or 4—definitely false). Higher scores indicate greater cognitive restraint, emotional eating, and/or uncontrolled eating.

2.2.6. Binge Eating Scale

Binge eating behavior and its severity were assessed using the French version of the Binge Eating Scale (BES) [27]. This is a 16-item self-administered scale that explores characteristics of behavioral, emotional, and cognitive manifestations of binge eating. An individual dimensional score is obtained

by summing the score of each item, offering a possible range from 0 to 46. The higher the score, the more severe the binge eating behavior, with a score greater than or equal to 18 indicating a binge eating disorder.

2.2.7. Dutch Eating Behavior Questionnaire

The DEBQ is a 33-item questionnaire, including three subscales that measure emotional, external, and restrained eating [28]. The emotional eating subscale (13 items) measures tendency to use food to cope with psychological problems and/or to alleviate distress. The external eating subscale (10 items) assesses the frequency of eating in response to external stimuli (*e.g.* the appearance and smell of food). The restrained eating subscale (10 items) assesses the frequency of restrictive conscious behaviors during eating. Each item was rated on a five-point scale ranging from 1 (never), 2 (seldom), 3 (sometimes), and 4 (often) to 5 (very often), with higher scores indicating more severe eating disorders.

2.2.8. Profile of Mood States

The POMS questionnaire is a 65-item questionnaire used to evaluate mood states [29]. A total of six dimensions of mood on a 5-point Likert scale are considered: tension/anxiety, depression, anger/hostility, vigor/activity, fatigue, and confusion/bewilderment. Higher scores on the subscale scores indicate more negative mood states (except on the vigor/activity scale where higher scores indicate stronger feelings of vigor/activity).

2.2.9. 48-hour food diary

Athletes tend to follow rigorous dietary regimes aligned with their sports practices, resulting in reduced variability in their daily nutrient intake compared to the general population [30]. Additionally, this preliminary analysis is part of a larger study that includes a phase where rapid weight loss was sometimes observed (within 2 days) [8]. Therefore, athletes were asked to complete a hard-copy 48h-food record in as much detail as possible related to the nature and quantity of every food and drink consumed [31]. If it was not possible to weigh food, athletes were provided with validated reference images from the SUVIMAX study [32] with which to estimate the portion size and weight. Total energy and macronutrient intake (absolute and relative) were calculated using the Nutrilog software (Version 3.20) (Nutrilog Europe Society, Marans, France). All of the included athletes did not receive any meals from the training facility over the study duration. Thus, meals were purchased, prepared and consumed directly by participants.

2.3. Statistical analyses

The sample size estimation was calculated according to i) the CONSORT 2010 statement, extension to randomized pilot and feasibility trials [33], ii) effect-size bounds recommended by Cohen's: small (ES: 0.2), medium (ES: 0.5) and large (ES: 0.8) [34] and iii) previous works reported in the literature [7,8]. For a two-sided type I error, a sample size of at least 14 individuals per subgroup would allow detection of at least 15% difference in body weight with a standard deviation of 13%, a probability of 0.05 and a beta level of 0.80.

Continuous data were presented as means and standard deviations according to their statistical distribution. The Shapiro-Wilk test was used to test the normality assumption. To identify extreme values, habitual percentage of weight loss data was stratified within inter- and intra-quartiles corresponding to the lowest 25% (quartile 1: group LOW), the 50% intermediate (quartile 2 + quartile 3 = group INTER) and the highest 25% (quartile 4 = group HIGH) of the habitual degree of weight loss distribution. Then, the differences between groups (weight loss categorized as aforementioned) were analyzed using analysis of variance or Kruskal-Wallis test followed, when necessary, by appropriate post-hoc test for two-by-two multiple comparisons: Tukey-Kramer post analysis of variance and Dunn after Kruskal-Wallis.

Mixed model analyses were also performed to test groups and interaction effects (*i.e.*, weight loss categorized x sex or weight loss categorized x hormonal status). These analyses were carried out for all participants and then separately for women and men. Pearson and Spearman correlation coefficients (noted r) were estimated in order to study the relationship between continuous variables, such as relationships between habitual degree of weight loss and anthropometry, body composition, the mood state profile, nutritional profile, energy intake, food reward and rapid weight loss score. Statistical analysis was performed using Statistica (version 8.00, Statsoft Inc., Tulsa, OK, USA). All statistical tests were carried out for a two-sided type I error at 5%, applying a correction for multiple comparisons when appropriate. As reported in the literature, specific attention was given to the magnitude of differences in addition to results from inferential statistical tests.

3. RESULTS

The general characteristics of the study population are presented in **Table 1**. According to the design, the habitual degree of weight loss (absolute and relative) was significantly different between groups ($p < 0.001$). There were more men, compared to women, and only weight-class athletes in the higher weight loss group (group HIGH). Athletes had 3 to 4 years of weight variation history on average.

Table 1. Weight cycling athletes' repartition in function of their habitual degree of weight loss and general characteristics.

	LOW n = 15	INTER n = 31	HIGH n = 16	p
Men (n =36)/Women (n = 26)	8/7	20/11*	8/8	
Women: HC- (n = 15)/HC+ (n = 11)	5/2	7/4	3/5	
Weight-class (n = 44)/Endurance (n =18)	7/8	21/10*	16/0*	
Age (y)	25.9 ± 5.6	23.4 ± 5.8	23.3 ± 3.3	0.26
Age when started weight cycling (y)	22.4 ± 5.2	19.1 ± 5.3	18.9 ± 3.5	0.10
Hours of sport/week	10.9 ± 2.8	11.0 ± 5.5	10.7 ± 3.4	0.98
Control body weight (kg)	64.4 ± 9.0	69.8 ± 10.3	69.2 ± 11.4	0.24
Habitual weight loss (kg)	1.3 ± 0.4	2.6 ± 0.5 ^{aa}	5.7 ± 2.6 ^{aaa, bbb}	<0.001
Habitual weight loss (%)	2.0 ± 0.5	3.8 ± 0.5 ^{aa}	8.1 ± 3.5 ^{aaa, bbb}	<0.001
Habitual weight loss duration (days)	22.2 ± 19.0	20.4 ± 16.9	38.3 ± 35.5	0.08

Habitual percentage of weight loss data was stratified within inter- and intra-quartiles corresponding to the lowest 25% (quartile 1: group LOW), the 50% intermediate (quartile 2 + quartile 3 = group INTER) and the highest 25% (quartile 4 = group HIGH) of the habitual degree of weight loss distribution.

HC-: non-hormonal contraceptive users; HC+: hormonal contraceptive users.

Data are presented as n or mean ± SD.

*: difference within the group.

aa, aaa: significantly different from LOW group at $p < 0.01$ and $p < 0.001$, respectively.

bbb: significantly different from INTER group at $p < 0.001$.

Weight class athletes: 23 men and 21 women.

Endurance athletes: 13 men and 5 women.

3.1. Relationships between habitual percentage of weight loss and anthropometry, body composition, the mood state profile, nutritional profile, energy intake, food reward and rapid weight loss score.

As presented in the **Table 2**, only absolute and relative protein and fat intake were significantly different between habitual weight loss groups (general group effects: $p = 0.04$, $p = 0.02$, $p < 0.001$ and $p = 0.01$, respectively), indicating that athletes who lose more weight per cycle were those with higher absolute and relative intake of protein and lower absolute and relative fat intake. RWL scores were also significantly different between the groups, with higher values in individuals habitually losing more weight ($p < 0.001$). Considering that 2 men and 2 women exhibited high degrees of habitual weight loss ($>10\%$), analyses were also performed excluding these 4 athletes. Relative protein intake, absolute and relative fat intake and RWL scores were still significantly different, while absolute protein intake was no longer significant, between groups ($p = 0.006$, $p = 0.02$, $p = 0.04$, $p < 0.001$, $p = 0.12$).

Table 2. Effect of the habitual degree of weight loss on anthropometry and body composition, the profile mood state, nutritional profile, energy intake, food reward and rapid weight loss score of the athletes.

	LOW n = 15	INTER n = 31	HIGH n = 16	p
Anthropometry and body composition				
Body weight (kg)	65.6 ± 9.3	71.2 ± 9.9	71.4 ± 13.5	0.22
TBW (kg)	39.9 ± 11.3	40.9 ± 6.2	40.7 ± 8.4	0.92
TBW (% of body weight)	59.4 ± 4.8	59.0 ± 5.7	58.5 ± 4.4	0.87
FM (kg)	10.5 ± 3.2	11.2 ± 5.4	11.5 ± 4.1	0.81
FM (%)	16.1 ± 4.9	15.7 ± 6.7	16.5 ± 5.7	0.90
FFM (kg)	52.8 ± 8.8	57.4 ± 9.1	57.4 ± 13.1	0.33
FFM (%)	80.4 ± 4.7	80.6 ± 6.6	79.7 ± 5.3	0.88
FFM/FM	5.5 ± 1.7	6.2 ± 2.6	5.3 ± 2.0	0.41
TBW/body weight	61.6 ± 10.0	59.0 ± 5.7	58.5 ± 4.4	0.38
TBW/FFM	79.0 ± 10.6	76.1 ± 2.2	76.6 ± 1.4	0.24
The profile of mood state				
POMS Tension/anxiety	8.7 ± 7.3	9.2 ± 5.3	9.3 ± 4.9	0.96
POMS Depression	6.7 ± 6.1	9.3 ± 8.4	5.8 ± 6.2	0.27
POMS Anger/hostility	8.8 ± 6.9	11.0 ± 7.6	9.3 ± 6.5	0.54
POMS Vigor/activity	18.8 ± 4.8	19.3 ± 4.5	19.6 ± 3.7	0.88
POMS Fatigue	9.3 ± 6.3	8.6 ± 5.5	7.7 ± 5.2	0.72
POMS Confusion	7.3 ± 4.1	8.3 ± 5.0	7.1 ± 4.6	0.67
Nutritional profile				
DEBQ Restrained	2.5 ± 0.6	3.1 ± 0.9	3.0 ± 0.7	0.10
DEBQ Emotional	1.8 ± 0.7	2.0 ± 0.9	2.2 ± 0.6	0.43
DEBQ External eating	2.7 ± 0.7	2.9 ± 0.7	2.9 ± 0.4	0.62
TFEQ Uncontrolled eating	2.3 ± 0.7	2.3 ± 0.6	2.2 ± 0.4	0.88
TFEQ Controlled eating	2.1 ± 0.5	2.5 ± 0.7	2.2 ± 0.5	0.07
TFEQ Emotional eating	1.9 ± 0.6	2.0 ± 0.7	2.2 ± 0.5	0.43
BES	6.6 ± 6.2	8.4 ± 6.2	8.8 ± 5.2	0.55
Energy intake				
EI (kcal.day ⁻¹)	2286.7 ± 497.2	2685.1 ± 856.4	2294.8 ± 770.9	0.14
Protein (g.day ⁻¹)	106.9 ± 33.7	104.9 ± 34.9	137.2 ± 57.4 ^{a,b}	0.04
Fat (g.day ⁻¹)	79.7 ± 25.7	101.0 ± 40.0	71.3 ± 35.2 ^b	0.02
CHO (g.day ⁻¹)	260.6 ± 89.0	314.3 ± 116.3	257.3 ± 89.2	0.12
Protein (% of EI.day ⁻¹)	19.3 ± 6.7	15.9 ± 3.3	24.5 ± 8.8 ^{a,bbb}	<0.001
Fat (% of EI.day ⁻¹)	31.1 ± 6.9	33.8 ± 6.8	27.2 ± 6.7 ^{a,bb}	0.01
CHO (% of EI.day ⁻¹)	45.1 ± 10.4	46.7 ± 6.8	45.0 ± 7.0	0.73
Protein (g.day ⁻¹ .kg ⁻¹)	1.6 ± 0.5	1.5 ± 0.5	1.9 ± 0.6 ^b	0.046
Food reward				
Explicit liking fat	-15.6 ± 19.9	-8.0 ± 17.0	-3.2 ± 15.2	0.15
Explicit wanting fat	-16.4 ± 18.6	-12.5 ± 17.0	-7.4 ± 17.2	0.36
Implicit wanting fat	-27.8 ± 27.6	-20.9 ± 32.1	-9.2 ± 31.1	0.25
Choice fat	-9.6 ± 9.4	-7.0 ± 10.5	-3.3 ± 11.3	0.25
Explicit liking taste	13.5 ± 22.9	18.5 ± 20.3	13.3 ± 33.9	0.73
Explicit wanting taste	12.1 ± 26.5	13.6 ± 22.1	9.1 ± 29.3	0.85
Implicit wanting taste	18.0 ± 43.2	13.0 ± 44.0	9.4 ± 50.2	0.87
Choice taste	6.6 ± 14.2	5.5 ± 14.7	4.0 ± 19.7	0.90
RWL questionnaire				

RWL score	15.1 ± 6.2	27.1 ± 12.3 ^{aa}	34.2 ± 10.6 ^{aaa,b}	<0.001
-----------	------------	---------------------------	------------------------------	------------------

Habitual percentage of weight loss data was stratified within inter- and intra-quartiles corresponding to the lowest 25% (quartile 1: group LOW), the 50% intermediate (quartile 2 + quartile 3 = group INTER) and the highest 25% (quartile 4 = group HIGH) of the habitual degree of weight loss distribution.

BES: Binge eating scale; CHO: carbohydrates; DEBQ: Dutch Eating Behavior Questionnaire; EI: energy intake; FFM: fat-free mass; FM: fat mass; POMS: Profile of Mood States; RWL: rapid weight loss; TBW: total body water; TFEQ: three-factor eating questionnaire. Relative macronutrient intake (protein, Fat, CHO%): percentage of total energy intake.

Data are presented as mean ± SD. Bold values indicate a significant P-value for a 2-sided type I error at 5%.

a, aa, aaa: significantly different from LOW group at $p < 0.005$, $p < 0.01$ and $p < 0.001$, respectively.

b, bb, bbb: significantly different from INTER group at $p < 0.005$, $p < 0.01$ and $p < 0.001$, respectively.

Across the study population, absolute and relative protein intake and RWL scores were positively associated with habitual percentage weight loss (protein (g): $r = 0.36$, $p = 0.007$; protein (%): $r = 0.49$, $p < 0.001$; and RWL score: $r = 0.39$, $p = 0.004$, respectively) (**Figure 1 and Table 3**). Conversely, relative fat intake was negatively associated with the habitual percentage of weight loss ($r = -0.33$, $p = 0.01$) (**Figure 2**). Significant correlations disappeared when the 4 athletes with the highest degree of weight loss were excluded from the analysis. No other significant relationship was observed between the degree of weight loss and other variables (**Table 3**). In addition, no significant association was observed between FFM or the percentage of FM and the RWL score ($r = 0.15$, $p = 0.27$ and $r = 0.04$, $p = 0.78$, respectively). Of note, the percentage of FM was not significantly associated with the habitual degree of weight loss in the HIGH group specifically.

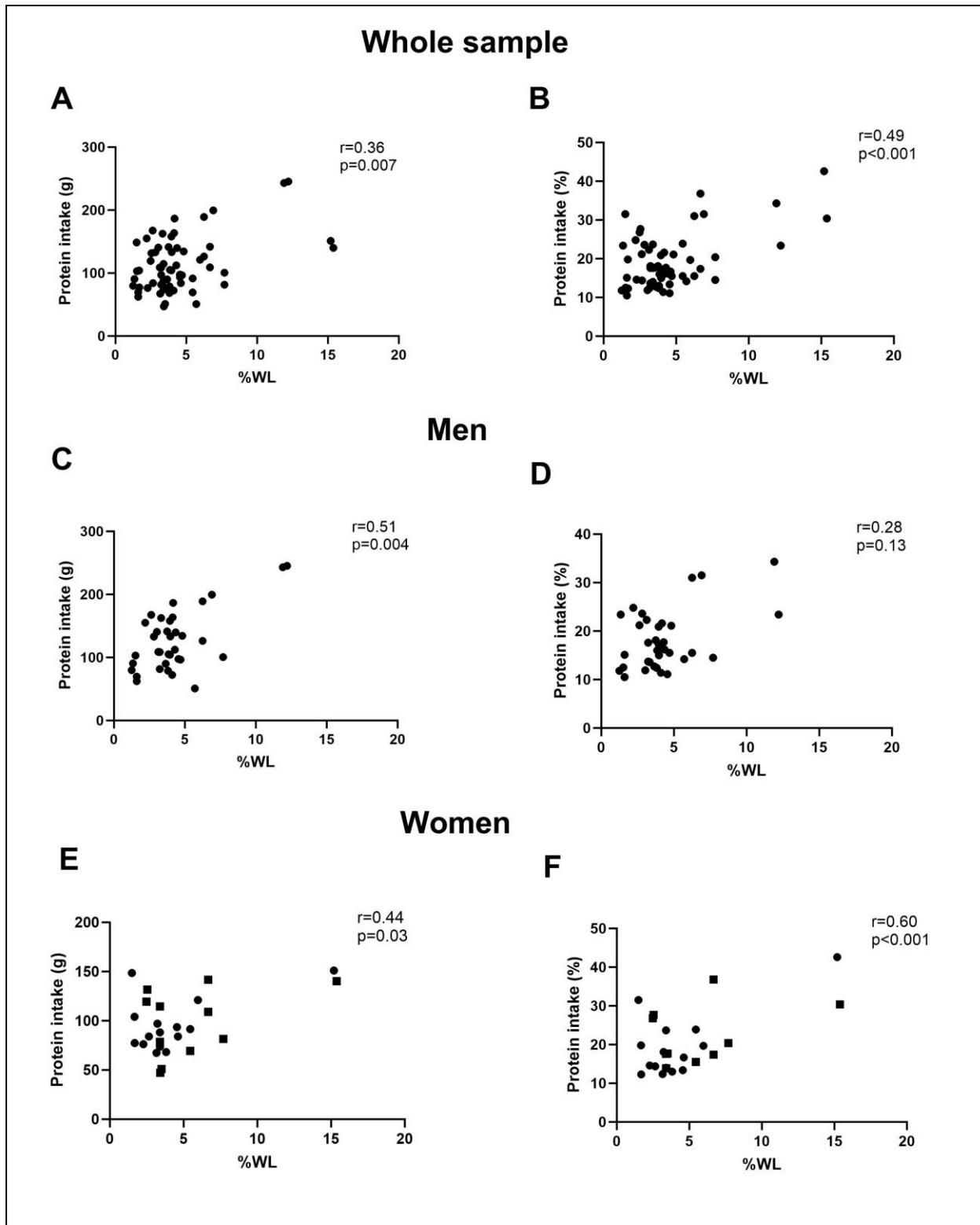


Figure 1. Associations between absolute (g) and relative (%) protein consumption and the habitual percentage of weight loss across the study population (A, B), men only (C, D) and women only (E, F).

Pearson and Spearman correlation coefficients (noted *r*) revealed a significant positive correlation between %WL and the absolute and relative protein intake considering the whole sample, men and women, except for relative protein intake in men. %WL: habitual percentage of weight loss; circle symbols represent women not using hormonal contraceptives and square symbols represent women using hormonal contraceptives.

Table 3. Associations between habitual degree of weight loss and anthropometry and body composition, the profile mood state, nutritional profile, energy intake, food reward and rapid weight loss score of the athletes.

	r	p
Anthropometry and body composition		
Body weight (kg)	-0.02	0.87
FM (%)	-0.03	0.79
FM (kg)	-0.06	0.66
FFM (%)	0.03	0.82
FFM (kg)	0.001	0.99
TBW (%)	0.06	0.65
TBW (kg)	-0.05	0.71
The profile of mood state		
Tension/anxiety	0.06	0.67
Depression	-0.11	0.44
Anger/hostility	-0.09	0.53
Vigour/activity	0.05	0.70
Fatigue	-0.10	0.47
Confusion	-0.17	0.22
Nutritional profile		
DEBQ RES	0.15	0.27
DEBQ EM	0.13	0.36
DEBQ EX	-0.08	0.57
TFEQ UE	-0.16	0.25
TFEQ CR	0.09	0.52
TFEQ EE	0.16	0.25
BES	0.09	0.53
Energy intake		
Total energy intake (kcal.day ⁻¹)	-0.03	0.84
Protein intake (g.day ⁻¹)	0.36	0.007
Protein intake (%)	0.49	<0.001
Fat intake (g.day ⁻¹)	-0.14	0.31
Fat intake (%)	-0.33	0.01
CHO intake (g.day ⁻¹)	-0.07	0.62
CHO intake (%)	-0.06	0.64
Food reward		
Explicit liking fat bias	0.20	0.14
Explicit wanting fat bias	0.20	0.14
Implicit wanting fat bias	0.14	0.30
Choice fat bias	0.12	0.37
Explicit liking taste bias	0.04	0.76
Explicit wanting taste bias	0.06	0.65
Implicit wanting taste bias	0.03	0.84
Choice taste bias	0.04	0.77
RWL questionnaire		
RWL score	0.39	0.004

BES: Binge eating scale; CHO: carbohydrates; DEBQ: Dutch Eating Behavior Questionnaire; EI: energy intake; FFM: fat-free mass; FM: fat mass; POMS: Profile of Mood States; RWL: rapid weight loss; TBW: total body water; TFEQ: three-factor eating questionnaire. Relative macronutrient intake (protein, Fat, CHO%): percentage of total energy intake.

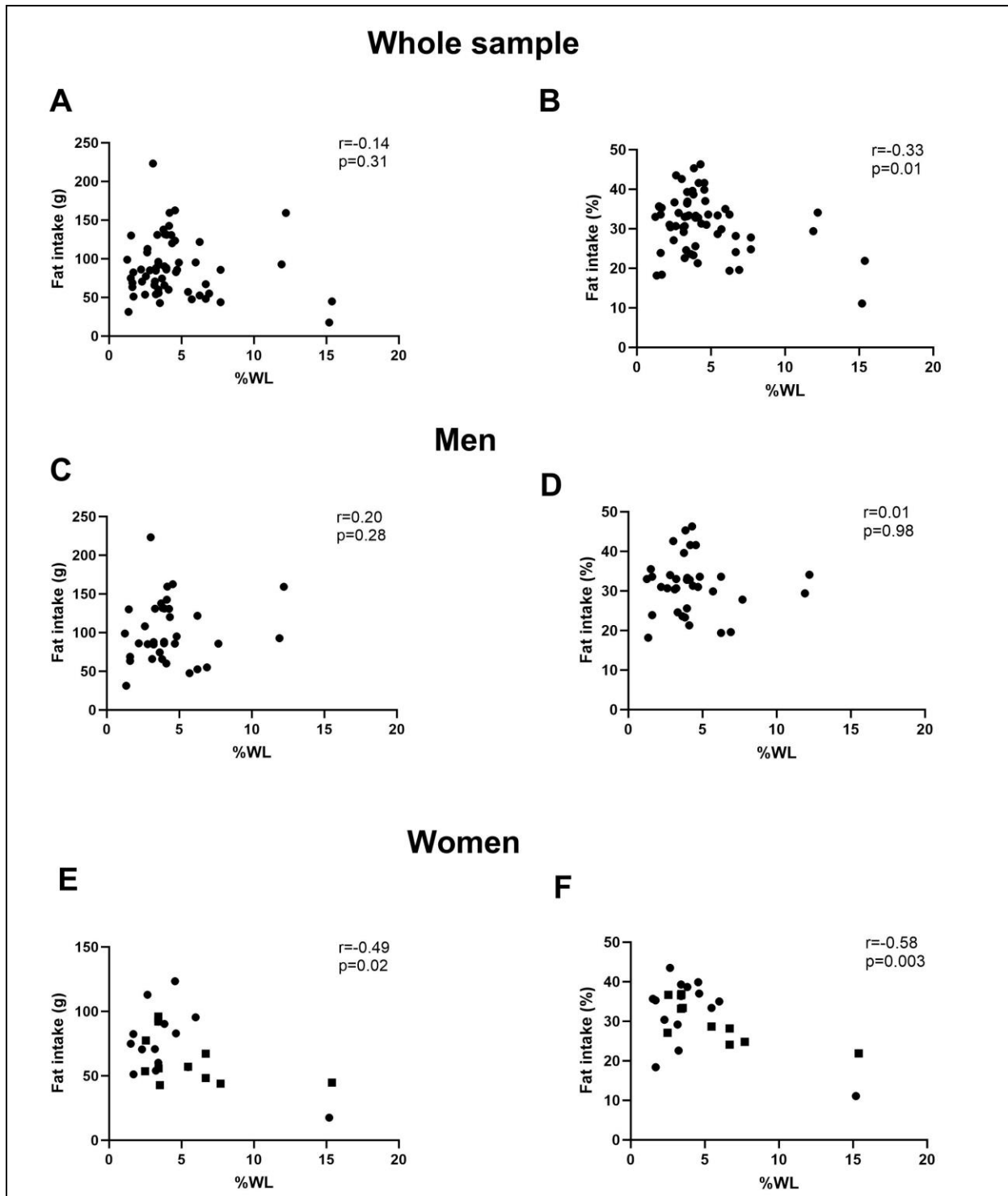


Figure 2. Associations between absolute (g) and relative (%) fat consumption and the habitual percentage of weight loss across the study population (A, B), men only (C, D) and women only (E, F).

Pearson and Spearman correlation coefficients (noted r) revealed a significant negative correlation between %WL and the relative fat intake in the whole sample, as well as between the %WL and the absolute and relative fat intake in women but not in men.

%WL: habitual percentage of weight loss; circle symbols represent women not using hormonal contraceptives and square symbols represent women using hormonal contraceptives.

3.2. Hormonal status considerations regarding the relationship between habitual percentage of weight loss and anthropometry, body composition, the mood state profile, nutritional profile, energy intake, food reward and rapid weight loss score.

Except the expected sexual dimorphism in anthropometric and body composition, no overall sex or interaction (sex x groups) effect was observed with regards to the other parameters assessed. In men, only absolute protein intake and RWL score were positively associated with habitual percentage of weight loss ($r=0.51$, $p=0.004$; $r=0.39$, $p=0.03$, respectively) (**Figures 1.C and 1.D**). In women, absolute and relative protein intake were positively associated with habitual percentage of weight loss ($r=0.44$, $p=0.03$; $r=0.60$, $p<0.001$, respectively) (**Figure 1.E and 1.F**), and, inversely, absolute and relative fat intake were negatively associated with the habitual percentage of weight loss ($r=-0.49$, $p=0.02$; $r=-0.58$, $p=0.003$, respectively) (**Figure 2.E and 2.F**). Similar correlations were observed within the subgroup of HC- women ($r=0.53$, $p=0.04$; $r=0.69$, $p=0.005$ for absolute and relative protein intake, respectively; $r=-0.50$, $p=0.05$; $r=-0.54$, $p=0.04$ for absolute and relative fat intake, respectively). Among the HC+ women, one woman was using a progestin implant, one a vaginal ring, and nine a monophasic combined oral pill. A significant association was also observed between RWL score and the habitual percentage of weight loss within HC- women ($r=0.60$, $p=0.02$), but no such association was observed within HC+ women (**Figure 3**).

When all women athletes were pooled, those using hormonal contraceptives had higher BES and POMS confusion/bewilderment scores than non-users (13.0 ± 5.6 vs. 7.5 ± 6.4 , $p=0.04$; 10.7 ± 6.1 vs. 6.1 ± 4.2 , $p=0.03$, respectively), whilst implicit wanting sweet taste bias and choice taste bias were significantly lower as compared to HC- women (-1.6 ± 49.0 vs. 31.8 ± 31.7 , $p=0.04$; -0.5 ± 18.6 vs. 12.2 ± 11.5 , $p=0.04$, respectively).

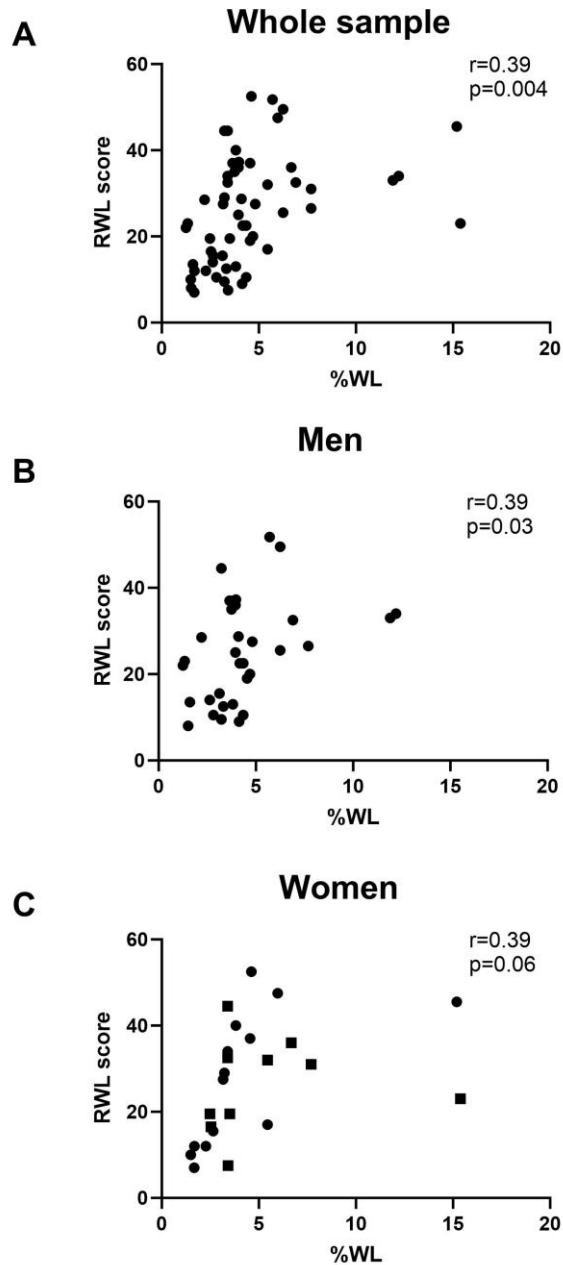


Figure 3. Associations between the rapid weight loss score and the habitual percentage of weight loss across the study population (A, B), men only (C, D) and women only (E, F).

Pearson and Spearman correlation coefficients (noted r) revealed a significant positive correlation between %WL and the RWL score considering the whole sample, men and women.

RWL: rapid weight loss; %WL: habitual percentage of weight loss; circle symbols represent women not using hormonal contraceptives and square symbols represent women using hormonal contraceptives.

3.3. Sport type considerations regarding the relationship between habitual percentage of weight loss and anthropometry, body composition, the mood state profile, nutritional profile, energy intake, food reward and rapid weight loss score.

As the third group was only composed of weight-class athletes, it was not possible to perform a mixed model analysis with two factors, namely weight loss groups and types of sports. Habitual percentage of weight loss was positively associated with relative protein intake but negatively associated with the relative fat intake ($r=0.47$, $p=0.003$; $r=-0.51$, $p=0.001$) in weight-class athletes. No other associations were observed in weight-class athletes nor any observed in those participating in endurance sports. When all interquartile groups were pooled, weight-class athletes were, on average, heavier (70.0 ± 10.9 vs. 64.1 ± 7.7 kg, $p=0.04$) and exhibited a higher habitual weight loss percentage (5.2 ± 3.1 vs. 2.8 ± 1.2 %, $p=0.003$) compared to endurance athletes. Weight-class athletes had higher absolute and relative protein intake (122.1 ± 45.3 vs. 94.2 ± 31.0 g, $p=0.02$; 20.6 ± 7.4 vs. 15.1 ± 3.8 %, $p=0.004$) and average RWL score (30.6 ± 11.5 vs. 14.0 ± 5.2 , $p<0.001$), but lower POMS vigour/activity score (18.5 ± 4.3 vs. 21.1 ± 3.8 , $p=0.04$), relative CHO intake (44.1 ± 7.5 vs. 50.1 ± 6.9 %, $p=0.005$) and explicit wanting taste bias (7.5 ± 25.6 vs. 23.0 ± 19.1 , $p=0.02$) than endurance athletes.

4. DISCUSSION

While most studies investigating dynamic variations of weight, as well as associated body composition and metabolic changes, have focused on nonathletic populations, it remains unclear whether athletes undergoing regular weight fluctuations are at a specific risk as a function of their habitual degree of weight loss. Contrary to our hypothesis, this preliminary study highlighted that weight and body composition in athletes accustomed to weight variations seemed to be independent of their habitual percentage of weight loss during a period of stable weight. However, the athletes with a higher habitual degree of weight loss were those who consumed more protein and less fat compared with those who habitually lose less weight during a period of weight maintenance. The RWL score was significantly higher in individuals who regularly lose more weight, but no difference was observed in the mood state profile.

According to our results, the athletes of the present study do not seem to display any specific risk in terms of nutritional or mood profiles, but the mean values of restrained and external eating DEBQ (*i.e.*, nearby or above 3) suggest a tendency towards dietary restriction and a sensitivity to external stimuli. These results seem consistent with the characteristics of the population (*i.e.*, athletes engaging in regular weight loss episodes). When the study population was stratified within inter- and intra-

quartiles according to their self-reported habitual percentage of weight loss, those losing more weight (5.7 ± 2.6 kg; 8.1%) consumed more protein and less fat compared to those habitually losing less weight (1.3 ± 0.2 kg; 2.0%) and displayed a significantly higher average RWL score. This higher RWL score reflected more aggressive patterns of weight loss which seems consistent with the type of practiced sport, as Group HIGH (those with the highest habitual degree of weight loss) was comprised solely of only weight-class athletes. Using the RWL questionnaire, Pélissier et al. previously highlighted that athletes with lower initial weights were those who (re)gained the most weight after a competition [19]. In addition, the younger the athlete started to practice weight variations, the higher the RWL score, suggesting more weight cycles over the sporting career results in more aggressive methods to reach a desired target weight. In the present study, no significant differences were observed between habitual weight loss percentage grouping in terms of age at which athletes began cutting weight (data not shown), although these athletes were relatively young, with, on average, only 3 to 4 years of weight variation history. As such, in future studies, it could be interesting to follow such athletes across several sporting seasons to determine any interactions between the weight variation history and the habitual degree of weight loss. Interestingly, the degree of habitual weight loss does not appear to be a determining factor in body weight, body composition and hydration status during a period of weight maintenance within this athletic population, with no association between body weight or FM during the period of weight maintenance and the habitual degree of weight loss observed. To our knowledge, this is the first study to demonstrate that athletes who underwent regular weight variations, with a higher degree of weight loss did not exhibit a higher body weight or percentage of FM during a period of weight maintenance. At first glance, this is somewhat in conflict with the seminal Minnesota Starvation Experiment, which provided conceptual support for an increased risk of collateral fattening and “fat overshoot” during a cycle of dramatic (~25% of pre-starvation body weight) weight loss and weight regain [35–37]. Likewise, the systematic review and meta-analysis from Pélissier et al. showed that dieters had a higher body weight than non-dieters in observational studies, and that the majority of the interventional studies suggested a risk of weight regain in dieters [7]. Conversely, in a recent systematic review, Sanaya et al. stressed that the majority of evidence suggest no adverse effect of weight cycling on body weight and body composition in healthy adults with normal weight, overweight or obesity [38]. Importantly, the present work focused on a population of athletes who were accustomed to regular weight variations, with weight loss in a physiological range (~2 to 8%). In a narrative review, Miles-Chan & Isacco discussed this phenomenon specifically in the context of athletes, and Bagot et al. recently questioned this risk in a systematic review and meta-analyses [2,8]. Altogether, even if the authors highlighted the need for more well-controlled studies on this topic, they did not stress specific weight gain risks in athletes.

Importantly, the self-reported higher protein intake observed in those losing more weight during weight variations, coupled with a general high level of physical activity in athletes, may be maintained during the weight loss phase, thus contributing to FFM preservation, and hence prevent fat overshoot during the weight regain phase, as previously hypothesized [2,8]. In that sense, no significant difference between groups was observed in FFM, FM and, importantly, in lean-fat partitioning during a period of weight maintenance, and no association was observed between the habitual percentage of weight loss and these parameters. Overall, the present results stress that a higher degree of weight loss does not place athletes at risk of excess percentage of FM over the short-term compared with those losing less. It is relevant to note however that the higher habitual weight losers were only composed of weight-class athletes and this type of sport is associated with a high daily protein consumption due to the high level of strength required to perform, and weight variations are often based on dehydration/rehydration strategies. In a recent systematic review, Anderson et al. highlighted the importance of dietary protein recommendation to mitigate the adverse effect of energy deficit in an analogous population, namely active-duty military personnel [39]. Conversely, individuals habitually losing more weight were also those who consumed less fat during a period of weight maintenance suggesting a potential control (either conscious or not) of nutritional intake in order to spare FFM and favor FM loss in athletes losing more weight. No significant relationship was observed between the degree of weight loss and the RWL score, and no difference was observed between groups regarding the total body water/FFM ratio, stressing no specific influence of the degree of weight loss, in a physiological range, on the aggressiveness of methods used and the hydration status in the context of weight maintenance. This may be suggestive of relative blunting of the leptin modulation of the tonic signals in function of energy storage, and thus FM and overall lean-fat partitioning [40], in athletes used to weight variations and that FFM may be the main nutritional driver due to the low body FM in this population. Silva et al. investigated FM and FFM changes across a sporting season and observed that those who gained at least 1.5% of body weight increased their FFM more than FM, and those who lost at least 1.5% of body weight displayed opposite body composition directional changes (*i.e.*, more FM lost and less FFM) [41]. The authors suggested that body composition dynamics in athletes may not follow the theoretical rules established for nonathletic population, and that FFM preservation may result from chronic vigorous exercise during the season. Indeed, Roth et al. stressed in their review the importance of resistance training volume in lean mass sparing in resistance-trained athletes during caloric restriction [42]. While stronger evidence was obtained in women than men, the authors emphasized that the effect of caloric restriction on lean mass sparing may be mediated by training and diet behaviors as well as energy deficit, suggesting a

role of the degree of weight loss in this relation. Overall, as proposed in different reviews, training volume, and specifically resistance training volume and underlying mechanisms (*i.e.*, anabolic signalling), may be a moderator of the FFM preservation in athletes accustomed to weight variations [8,42]. No difference in body composition was observed between the different groups in the present study, bringing novelty in this field as body composition and nutritional and mood profiles were investigated during a weight-maintenance period as a function of the habitual degree of weight loss (beyond 1.5% of body weight for the three groups). Importantly, when the 4 athletes (2 men and 2 women) who exhibited the highest degrees of habitual weight loss were excluded from the analyses, relative protein and fat consumption remained significantly higher and lower, respectively, in Group HIGH. However, the correlations between the habitual percentage of weight loss and the macronutrient intake were not significant anymore, highlighting the substantial influence of the highest degrees of weight loss in these relationships. Overall, this may underline specific nutritional regulations and body composition variations within athletic populations due to their physical activity level and the purpose of the weight loss practices (*i.e.*, sport performance), at least during their sporting career. Further longitudinal studies are needed to better understand the body composition, nutritional and metabolic responses to whole weight cycles in athletes.

Interestingly, even if the reduced sample size implies the need to interpret results with caution, the sex-based distinctions observed concerning the association between macronutrient intake (*i.e.*, absolute and relative protein and fat consumption) and the habitual degree of weight loss may reinforce the hypothesized relationship between the lean-fat partitioning and the habitual degree of weight loss. Indeed, the negative relationship between fat consumption and the habitual degree of weight loss was only observed in women, in line with their specific lean-fat partitioning, as compared to men. No association was specifically observed in endurance athletes but the lower and more homogeneous habitual degree of weight loss in this population may have prevented such observations from being made. In addition, when all groups were pooled, weight-class athletes had significantly higher absolute and relative protein intake, and lower CHO intake compared to endurance athletes, meaning that the sport type is a key determinant of the athletes' macronutrient selection aimed at optimizing performance in their respective sports. Hypotheses proposed to explain weight regain and, notably catch-up fat, after weight loss include adaptative thermogenesis and hyperphagia. Miles-Chan and Isacco questioned the presence of hyperphagia in athletes during weight loss episodes, knowing that the subconscious autoregulatory drive to eat may be counteracted by a restriction of food intake during an athlete sporting career [2]. According to the BES questionnaire, designed to assess the extent and severity of binge eating behaviors, no significant difference was observed between the different

habitual weight loss groupings, with the score of $8.8 (\pm 5.2)$ indicative of an absence of binge eating disorders within this study population. Indeed, based on the BES total score, individuals can be categorized into three groups according to established cut-off scores for binge eating severity (*i.e.*, no binge eating with a score ≤ 17 , mild to moderate binge eating with a score of 18–26, and severe binge eating with a score ≥ 27) [43]. Importantly, athletes answered the questionnaires during a weight maintenance period, and results could have been different during a period of weight loss or regain. Interestingly, when all interquartile groups were pooled, HC+ women had higher BES scores (13.0 ± 5.6 vs 7.5 ± 6.4 , respectively) compared with HC- women. While it was not possible to discriminate women as a function of both their HC status and habitual degree of weight loss due to the small sample size, and despite scores being below 17 on average, the present data suggest a potential influence of the use of HC on eating behaviors in female athletes. In this sense, previous studies have observed specific homeostatic responses related to neurocognitive control in women depending on their ovarian hormonal status [44,45] and this needs to be specifically studied in athletes to better optimize training and dietary counselling.

Considering the study population as a whole, one may argue that the habitual degree of weight loss reported might not have been sufficient, even amongst the highest habitual losers, to observe any significant influence of the considered parameters. Yet, Lakicevic et al. recently showed in a systematic review that a RWL score of equal to or greater than 5% per week was associated with more tension and less vigor in judo athletes (POMS questionnaire) [20]. The third group of the present study, characterized by a mean habitual percentage of weight loss of 8.1%, with a higher RWL score and only composed of weight-class athletes, could be considered as similar to the study population of Lakicevic et al. Conversely, no significant difference was observed between the three groups in POMS or eating behavior scores in the present study, with very homogeneous values noted between groups. It may be hypothesized that, in a population of healthy athletes accustomed to weight variations, the lean-fat partitioning and the nature of the practiced sport drive macronutrient selection in order to preserve body composition characteristics and to optimize sport performance as a function of the habitual degree of weight loss, without affecting mood during a period of weight maintenance.

The present results must obviously be interpreted in light of some limitations. Indeed, the sample size may be considered limited due, notably, to the stratification of the sample into groups (*i.e.*, inter- and intra-quartiles). However, considering the primary objective of the study, it was relevant to determine the extreme values of habitual weight loss and investigate how they differed from values closer to the average, thus the use of this type of stratification was necessary. Importantly, when the sample was stratified according to median or tertiles, similar results were obtained (data not presented). In

addition, one of the unfortunate limitations of this study, as in most of the studies conducted in this topic thus far, was the utilization of self-reported questionnaires for the majority of variables considered, except for the anthropometric and body composition parameters. It is worth noting that self-reported data have been shown to be reliable among athletes [46] and body composition was assessed by gold-standard methodology (*i.e.*, DXA). However, while the average amount of sport practice was self-reported by athletes, physical activity levels were not objectively measured (*e.g.*, using an accelerometer), which represents a methodological limitation of the present work. Importantly, all athletes in the present study did not benefit from dietary amenities at their training centre, which could have influenced food accessibility, choices and selection and, overall, energy intake during weight maintenance. In addition, while one may argue that the present results only reinforce the standard nutritionist dieting advice for optimizing weight loss in athletes, several points need to be considered, such as i) not all athletes benefit from health professionals and/or ii) sport culture and beliefs may often extend beyond the scope of professional advice. In addition, the novelty of the present work lies in the determination of the relationship between the habitual degree of weight loss and dietary behaviors and nutritional profiles in athletes accustomed to weight variations during a period of weight maintenance to potentially identify specific health risks. The relevance of including endurance athletes in the present study may be questioned due to the small sample size and the lower habitual degree of weight loss as compared to weight-class athletes, as illustrated by the absence of endurance athletes in the third (highest) habitual weight loss group. Regrettably, despite being accustomed to weight variations for specific sporting events, even if it is more the result of their training as opposed to being connected to performance *per se*, endurance athletes are rarely considered in studies investigating this topic and it is thus a strength of the present work. Future studies on weight variations in athletes should consider endurance athletes as unique in their habitual variation patterns. Finally, according to the main objective of the present preliminary study being specific to health, no data on performance was provided. The ongoing “WAVE study” conducted by our research group will provide objective evaluations of these endurance and strength performances during and in response to an entire weight cycling episode.

To conclude, considering that variations in body weight and composition are common across an athlete’s career, it is important to characterize the anthropometry, body composition, nutritional and mood profiles of athletes accustomed to weight variations as a function of their habitual degree of weight loss. The present results highlight that athletes accustomed to losing more weight are those who consume more protein and less fat during a period of weight maintenance compared to those habitually losing less weight, without any difference in body composition (FM, FFM and lean-fat

partitioning) between groupings. This may suggest potential restriction of dietary intake in order to spare FFM and favor FM loss in athletes losing more weight. Moreover, it would be of importance to examine the anthropometry, body composition, nutritional characteristics, or mood profile during periods of weight loss and weight (re)gain. Interestingly, even if the small sample size necessitates that these results be interpreted with caution, distinctions based on sex may emerge regarding the associations between macronutrient selection and the habitual degree of weight loss, which may reinforce the importance of considering hormonal status (sex, hormonal contraception) as a biological variable to optimize athlete health and performance.

Acknowledgment

The authors have no acknowledgments to declare.

Sources of Support

This work was realized as a part of the French “Plan de Relance” fund from the National Research Agency (ANR) and the International Health in Motion Chair.

Author Contributions

Conceptualization: MD, LI, JMC, DT; Data curation: SB, LI; Formal analysis: BP; Writing - original draft: SB; Writing - review & editing: ECB, MD, CG, LI, JMC, DT.

All authors read and approved the final version of the manuscript.

Author Declarations

The authors have no conflicts of interest to declare.

REFERENCES

- [1] Bosy-Westphal A, Kahlhöfer J, Lagerpusch M, Skurk T, Müller MJ. Deep body composition phenotyping during weight cycling: relevance to metabolic efficiency and metabolic risk. *Obes Rev* 2015;16 Suppl 1:36–44. doi: 10.1111/obr.12254.
- [2] Miles-Chan JL, Isacco L. Weight cycling practices in sport: A risk factor for later obesity? *Obes Rev* 2021;22. doi: 10.1111/obr.13188.
- [3] Montani J-P, Schutz Y, Dulloo AG. Dieting and weight cycling as risk factors for cardiometabolic diseases: who is really at risk? *Obes Rev* 2015;16:7–18. doi: 10.1111/obr.12251.
- [4] Pietiläinen KH, Saarni SE, Kaprio J, Rissanen A. Does dieting make you fat? A twin study. *International Journal of Obesity* 2012. doi: 10.1038/ijo.2011.160.
- [5] Forbes GB. Lean Body Mass-body fat interrelationships in humans. *Nutr Rev* 1987. doi: 10.1111/j.1753-4887.1987.tb02684.x.
- [6] Forbes GB. Body fat content influences the body composition response to nutrition and exercise. vol. 904, *Ann N Y Acad Sci*; 2000, p. 359–65. doi: 10.1111/j.1749-6632.2000.tb06482.x.
- [7] Pélissier L, Bagot S, Miles-Chan JL, Pereira B, Boirie Y, Duclos M, et al. Is dieting a risk for higher weight gain in normal-weight individual? A systematic review and meta-analysis. *Br J Nutr* 2023;130:1190–212. doi: 10.1017/S0007114523000132.
- [8] Bagot S, Pélissier L, Pereira B, Chanséaume Bussiere E, Duclos M, Dulloo A, et al. Weight regain, body composition, and metabolic responses to weight loss in weight cycling athletes: A systematic review and meta-analyses. *Obes Rev* 2024;25:e13658. doi: 10.1111/obr.13658.
- [9] Heydenreich J, Kayser B, Schutz Y, Melzer K. Total energy expenditure, energy intake, and body composition in endurance athletes across the training season: a systematic review. *Sports Med Open* 2017;3:8–8. doi: 10.1186/s40798-017-0076-1.
- [10] Artioli GG, Gualano B, Franchini E, Scagliusi FB, Takesian M, Fuchs M, et al. Prevalence, magnitude, and methods of rapid weight loss among judo competitors. *Med Sci Sports Exerc* 2010;42:436–42. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181ba8055.
- [11] Lebron MA, Stout JR, Fukuda DH. Physiological perturbations in combat sports: weight cycling and metabolic function—a narrative review. *Metabolites* 2024;14:83. doi: 10.3390/metabo14020083.
- [12] Saarni SE, Rissanen A, Sarna S, Koskenvuo M, Kaprio J. Weight cycling of athletes and subsequent weight gain in middleage. *Int J Obes* 2006;30:1639–44. doi: 10.1038/sj.ijo.0803325.
- [13] Marquet L, Brown M, Tafflet M, Nassif H, Mouraby R, Bourhaleb S, et al. No effect of weight cycling on the post-career BMI of weight class elite athletes. *BMC Public Health* 2013;13:510–510. doi: 10.1186/1471-2458-13-510.
- [14] Emami M, Behforouz A, Jarahi L, Zarifian A, Rashidlamir A, Rashed MM, et al. The risk of developing obesity, insulin resistance, and metabolic syndrome in former power-sports athletes - does sports career termination increase the risk. *Indian J Endocrinol Metab* 2018;22:515–9. doi: 10.4103/ijem.IJEM_83_18.
- [15] Nindl BC, Friedl KE, Frykman PN, Marchitelli LJ, Shippee RL, Patton JF. Physical performance and metabolic recovery among lean, healthy men following a prolonged energy deficit. *Int J Sports Med* 1997;18:317–24. doi: 10.1055/s-2007-972640.
- [16] Friedl KE, Moore RJ, Hoyt RW, Marchitelli LJ, Martinez-Lopez LE, Askew EW. Endocrine markers of semistarvation in healthy lean men in a multistressor environment. *J Appl Physiol* 2000;88:1820–30. doi: 10.1152/jappl.2000.88.5.1820.
- [17] Tassone EC, Baker BA. Body weight and body composition changes during military training and deployment involving the use of combat rations: a systematic literature review. *Br J Nutr* 2017;117:897–910. doi: 10.1017/S0007114517000630.

- [18] Sundgot-Borgen J, Torstveit MK. Prevalence of eating disorders in elite athletes is higher than in the general population. *Clin J Sport Med* 2004. doi: 10.1097/00042752-200401000-00005.
- [19] Pélissier L, Ennequin G, Bagot S, Pereira B, Lachèze T, Duclos M, et al. Lightest weight-class athletes are at higher risk of weight regain: results from the French-Rapid Weight Loss Questionnaire. *Phys Sportsmed* 2023;51:144–52. doi: 10.1080/00913847.2021.2014285.
- [20] Lakicevic N, Thomas E, Isacco L, Pettersson S, Tcymbal A, Roklicer R, et al. Rapid weight loss and mood states in judo athletes. A systematic review. *Eur Rev Appl Psychol* 2023. doi: 10.1016/j.erap.2023.100933
- [21] Blaak E. Gender differences in fat metabolism. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care* 2001;4:499–502.
- [22] Boisseau N, Isacco L. Substrate metabolism during exercise: Sexual dimorphism and women’s specificities. *Eur J Sport Sci* 2022;22:672–83. doi: 10.1080/17461391.2021.1943713.
- [23] Artioli GG, Scagliusi F, Kashiwagura D, Franchini E, Gualano B, Junior AL. Development, validity and reliability of a questionnaire designed to evaluate rapid weight loss patterns in judo players. *Scand J Med Sci Sports* 2010;20:e177-87. doi: 10.1111/j.1600-0838.2009.00940.x.
- [24] Finlayson G, King N, Blundell JE. Is it possible to dissociate “liking” and “wanting” for foods in humans? A novel experimental procedure. *Physiol Behav* 2007;90:36–42. doi: 10.1016/j.physbeh.2006.08.020.
- [25] Thivel D, Oustric P, Beaulieu K, Moore H, Bonjean L, Loglisci J, et al. Development, sensitivity and reliability of a French version of the Leeds food preference questionnaire (LFPQ-fr) for the evaluation of food preferences and reward. *Physiol Behav* 2023;267:114187. doi: 10.1016/j.physbeh.2023.114187.
- [26] Péneau S, Bénard M, Robert M, Allès B, Andreeva VA, Courtois F, et al. Validation of the flexible and rigid cognitive restraint scales in a general French population. *Int J Environ Res Public Health* 2022;19:12519. doi: 10.3390/ijerph191912519.
- [27] Brunault P, Gaillard P, Ballon N, Couet C, Isnard P, Cook S, et al. Validation of the French version of the Binge Eating Scale: examination of its factor structure, internal consistency and construct validity in a non-clinical and a clinical population. *Encephale* 2016;42:426–33. doi: 10.1016/j.encep.2016.02.009.
- [28] van Strien T, Frijters JER, Bergers GPA, Defares PB. The Dutch Eating Behavior Questionnaire (DEBQ) for assessment of restrained, emotional, and external eating behavior. *Int J Eat Disord* 1986;5:295–315. doi: 10.1002/1098-108X(198602)5:2<295::AID-EAT2260050209>3.0.CO;2-T.
- [29] Lorr M, McNair D, Droppleman L. Manual: Profile of Mood States. Educational and industrial testing service. San Diego: 1971.
- [30] Guo S, Shaoni GLL, Stuart-Smith WA, Davies AJ, Gifford JA. Dietary intake of masters athletes: a systematic review. *Nutrients* 2023;15:4973. doi: 10.3390/nu15234973.
- [31] Burke LM. Dietary assessment methods for the athlete: pros and cons of different methods. Gatorade Sports Science Institute 2015.
- [32] Julia C, Méjean C, Touvier M, Péneau S, Lassale C, Ducrot P, et al. Validation of the FSA nutrient profiling system dietary index in French adults-findings from SUVIMAX study. *Eur J Nutr* 2016;55:1901–10. doi: 10.1007/s00394-015-1006-y.
- [33] CONSORT 2010 Statement: updated guidelines for reporting parallel group randomised trials | EQUATOR Network n.d. www.equator-network.org/reporting-guidelines/consort/ (accessed July 5, 2024).
- [34] Cohen J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. Second Edi. Mahwah: NJ: Lawrence Erlbaum Associates; 1988.
- [35] Dulloo AG, Jacquet J, Girardier L. Poststarvation hyperphagia and body fat overshooting in humans: a role for feedback signals from lean and fat tissues. *Am J Clin Nutr*. 1997;65:717–23. doi: 10.1093/ajcn/65.3.717.

- [36] Dulloo AG, Jacquet J, Seydoux J, Montani J-P. The thrifty “catch-up fat” phenotype: its impact on insulin sensitivity during growth trajectories to obesity and metabolic syndrome. *International Journal of Obesity* (2005) 2006;30 Suppl 4:S23-35. doi: 10.1038/sj.ijo.0803516.
- [37] Dulloo AG, Jacquet J, Montani JP. How dieting makes some fatter: from a perspective of human body composition autoregulation. *Proc Nutr Soc* 2012;71:379–89. doi: 10.1017/S0029665112000225.
- [38] Sanaya N, Janusaite M, Dalamaga M, Magkos F. The physiological effects of weight-cycling: a review of current evidence. *Curr Obes Rep* 2024;13:35–50. doi: 10.1007/s13679-023-00539-8.
- [39] Anderson RE, Casperson SL, Kho H, Flack KD. The role of dietary protein in body weight regulation among active-duty military personnel during energy deficit: a systematic review. *Nutrients* 2023;15:3948. doi: 10.3390/nu15183948.
- [40] Halford JC, Blundell JE. Separate systems for serotonin and leptin in appetite control. *Ann Med* 2000;32:222–32. doi: 10.3109/07853890008998829.
- [41] Silva AM, Matias CN, Santos DA, Rocha PM, Minderico CS, Thomas D, et al. Do dynamic fat and fat-free mass changes follow theoretical driven rules in athletes? *Med Sci Sports Exerc* 2017. doi: 10.1249/MSS.0000000000001332.
- [42] Roth C, Schoenfeld BJ, Behringer M. Lean mass sparing in resistance-trained athletes during caloric restriction: the role of resistance training volume. *Eur J Appl Physiol* 2022;122:1129–51. doi: 10.1007/s00421-022-04896-5.
- [43] Marcus MD, Wing RR, Hopkins J. Obese binge eaters: affect, cognitions, and response to behavioural weight control. *J Consult Clin Psychol* 1988;56:433–9. doi: 10.1037//0022-006x.56.3.433.
- [44] Arnoni-Bauer Y, Bick A, Raz N, Imbar T, Amos S, Agmon O, et al. Is it me or my hormones? Neuroendocrine activation profiles to visual food stimuli across the menstrual cycle. *J Clin Endocrinol Metab* 2017;102:3406–14. doi: 10.1210/jc.2016-3921.
- [45] Malo-Vintimilla L, Aguirre C, Vergara A, Fernández-Verdejo R, Galgani JE. Resting energy metabolism and sweet taste preference during the menstrual cycle in healthy women. *Br J Nutr* 2023;1–7. doi: 10.1017/S0007114523001927.
- [46] Saw AE, Main LC, Gatin PB. Monitoring the athlete training response: subjective self-reported measures trump commonly used objective measures: a systematic review. *Br J Sports Med* 2016;50:281–91. doi: 10.1136/bjsports-2015-094758.

ÉTUDE 2

Adaptations métaboliques à un épisode de perte et reprise de poids chez des athlètes habitués au « *weight cycling* ».

Résultats de l'étude WAVE

**THE TYPE OF SPORT, BUT NOT SEX, IMPACTS BODY COMPOSITION AND METABOLIC
RESPONSE TO A COMPLETE WEIGHT LOSS – WEIGHT REGAIN EPISODE IN WEIGHT CYCLING
ATHLETES. RESULTS FROM THE WAVE STUDY.**

Running title: Weight Cycling and Metabolism

Sarah BAGOT^{1*}, Ines RAMOS², Jennifer MILES-CHAN³, Abdul DULLOO⁴, Anthony C HACKNEY^{5,6}, Yves
BOIRIE⁷, Martine DUCLOS^{8,9}, David THIVEL^{1,9}, Laurie ISACCO^{1,9}

1. Clermont Auvergne University, EA 3533, Laboratory of the Metabolic Adaptations to Exercise under Physiological and Pathological Conditions (AME2P), CRNH Auvergne, Clermont-Ferrand, France. sarah.bagot@uca.fr, laurie.isacco@uca.fr, david.thivel@uca.fr.

2. Clermont-Ferrand University Hospital, Biostatistics Unit (DRCI), Clermont-Ferrand, France. iramos@chu-clermontferrand.fr.

3. Human Nutrition Unit, School of Biological Sciences, University of Auckland, Auckland, New Zealand. j.miles-chan@auckland.ac.nz.

4. Faculty of Science and Medicine, University of Fribourg, Fribourg CH-1700, Switzerland. abdul.dulloo@alumni.unifr.ch.

5. Department of Exercise & Sport Science, University of North Carolina, Chapel Hill, NC 27599, USA. ach@email.unc.edu.

6. Department of Nutrition, Gillings School of Global Public Health, University of North Carolina, Chapel Hill, NC 27599, USA.

7. Department of Human Nutrition, Clermont-Ferrand University Hospital, G. Montpied Hospital, Clermont-Ferrand 63000, France. yves.boire@uca.fr.

8. Department of Sport Medicine and Functional Explorations, CHU Clermont-Ferrand, Clermont-Ferrand, France. mduclos@chu-clermontferrand.fr.

9. International Research Chair Health in Motion, Clermont Auvergne University Foundation, Clermont-Ferrand, France.

***Corresponding author:** Sarah BAGOT, Clermont Auvergne University, UPR 3533, Laboratory of the Metabolic Adaptations to Exercise under Physiological and Pathological Conditions (AME2P), CRNH Auvergne, Clermont-Ferrand, France. sarah.bagot@uca.fr.

ABSTRACT

Athletes may engage in weight cycling —successive episodes of weight loss and weight (re)gain—for performance reasons, but risk metabolic adaptations and regaining more fat than was lost (fat overshoot). This study aimed to assess the influence of a complete weight cycling episode on body composition, thermoregulation, and metabolism in athletes, considering sex and the type of sport practiced. Forty-eight athletes (28 males, 20 females) engaged in combat (n=23), strength (n=12), or endurance (n=13) sports were examined under 3 experimental conditions (weight maintenance, weight loss, weight (re)gain) during a weight cycling episode using their habitual strategies. Body composition (dual-energy X-ray absorptiometry), core body temperature (telemetric temperature sensor), energy expenditure and substrate oxidation at rest and during moderate exercise (indirect calorimetry), and energy intake (48h-food record) were assessed. Athletes lost $4.4 \pm 2.3\%$ body weight, $12.2 \pm 10.6\%$ fat mass, and $2.6 \pm 2.3\%$ fat-free mass ($p < 0.001$). All variables returned to baseline values during the regain period. However, a higher fat mass regain was observed in endurance than combat athletes ($p < 0.01$). During weight loss, a transient increase in lipid and decrease in carbohydrate oxidation occurred at rest and during exercise ($p < 0.001$). Energy expenditure and core body temperature remained unchanged across the 3 experimental conditions. No specific sex effect was observed. Overall, no apparent body weight or fat overshoot was observed in athletes after a complete weight cycling episode. Nonetheless, endurance athletes seem at higher risk for fat overshooting, highlighting a need for further specific long-term studies on this population.

Keywords: sports, fat mass, endurance, weight class, temperature, metabolism

Ethical approval: 2019-A00699-48

Clinical Trial registration: NCT04107545

Take home message: Athletes used to weight cycling show temporary metabolic adaptations to a moderate weight loss and regain episode, without short-term 'fat overshoot.' However, endurance athletes face a higher risk of 'catch-up fat' and long-term 'fat overshoot.'

1. INTRODUCTION

In many competitive sports, athletes may engage in successive episodes of weight loss (WL) and (re)gain (WG) over time, known as "weight cycling". Mainly carried out for performance reasons, the characteristics of WL (*e.g.*, frequency, magnitude, duration) may differ according to the type of sport performed and the athlete's objectives. Overall, athletes partake in WL practices to gain advantage against other competitors, whether to enter within a specific weight category, to optimize their power-to-weight ratio or for technical/aesthetic reasons [1,2]. Various methods to create an energy deficit, and to thus lose weight, exist (*e.g.*, calorie restriction and/or increased exercise), some of which are considered extreme (*e.g.*, prolonged fasting, rapid weight loss, dehydration, vomiting), and result in short-to-long term health consequences in athletes (*e.g.*, increased fatigue, cardiometabolic comorbidities, eating disorders, mood changes) [3,4]. Weight loss, and its associated metabolic adaptations, may also influence subsequent regain of body weight and composition. In the seminal Minnesota Experiment [5], a 25%-WL induced by semi-starvation in individuals with normal weight led a preferential regain of fat mass (FM) relative to lean mass - termed the "catch-up fat phenomenon" (6), and to more body fat being regained than was lost (fat "overshoot"), resulting in a higher body weight and fat post-recovery than pre-starvation (baseline) values. Three main underlying mechanisms have been proposed to explain this phenomenon: i) excessive compensatory hyperphagia, ii) intrinsic control of lean-fat body energy partitioning, and iii) WL-induced adaptive thermogenesis (namely "thrifty" metabolism) which may persist to drive catch-up fat during weight recovery [6].

However, due to the extreme experimental conditions and severity of weight loss imposed during the Minnesota Experiment, the extrapolation of the "catch-up fat" and "fat overshooting" phenomena to weight cycling athletes (in whom the weight losses are generally more modest) has been theoretically questioned by Miles-Chan and Isacco [7]. A conceptual and hypothetical model of body composition recovery in this specific population has been proposed suggesting relative protection from fat overshooting [7].

This has been more recently reinforced in a systematic review and meta-analyses that did not report any body weight nor fat overshoot after an episode of WL and WG in weight cycling athletes, whatever the type of sports (combat, strength) or strategies employed (rapid and/or long weight loss and regain) [8]. This may be explained by (i) a loss in body fat that is not severe enough to trigger adaptive thermogenesis that contributes to catch-up fat, and (ii) a lesser reduction of lean or fat-free mass (FFM) relative to loss of fat mass in athletes, resulting in a potential alleviation of the putative impact of FFM deficit on food intake during weight recovery in weight cycling athletes [8]. However, studies in this specific population are limited and no firm conclusion has been formulated thus far. Notably, Isola et al. observed a transient adaptive thermogenesis in male and female bodybuilders who underwent a

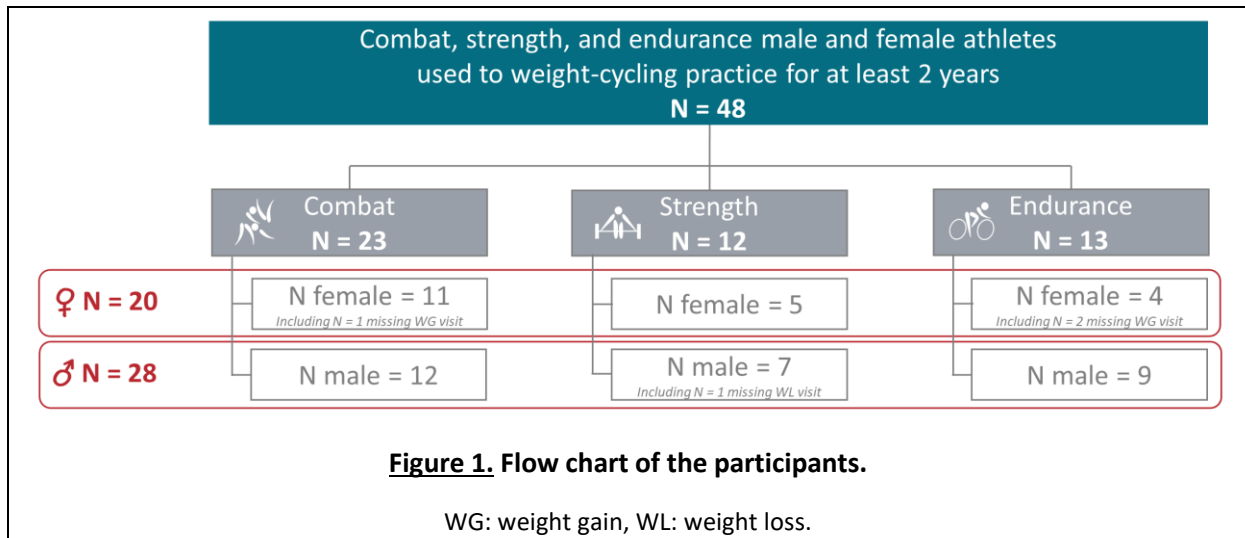
substantial WL of 14%, resulting in FM levels approaching critical lower limits (5.6 ± 2.1 %FM and 12.6 ± 6.0 %FM, respectively) [9]. In contrast, this phenomenon was not observed in resistance-trained or combat sports athletes with a less substantial WL (*i.e.*, 4-5%) [10–12]. However, all of these studies observed transient modifications in substrate metabolism with, notably, a reduction in resting carbohydrate (CHO) utilization during WL [8–11,13]. Interestingly, while there is consensus on sexual dimorphism in body composition [14], females represent only 10% of the participants included in existing studies in this field [8]. Isola et al. observed a sex difference with a greater FFM decrease in males than females during WL, highlighting the importance of considering sex as a determinant of lean-fat partitioning responses to WL and WG episodes [9]. Moreover, as approximately 40% of total energy expenditure in adults is dedicated to thermoregulation, Landsberg [15] highlighted that a decrease in core body temperature (T_c) in response to food deprivation and WL could persist during WG, thus contributing to a “thrifty” metabolism. However, the role of thermoregulation as an underlying mechanism for energy conservation has never been investigated in weight cycling athletes.

Therefore, the aims of the present study were to i) assess changes in body composition, core body temperature, and energy metabolism (fasted resting and during moderate exercise) in response to a WL and WG episode among weight cycling athletes, and ii) determine whether these responses differ according to sex and/or the type of sport practiced.

2. METHODS

2.1. Participants

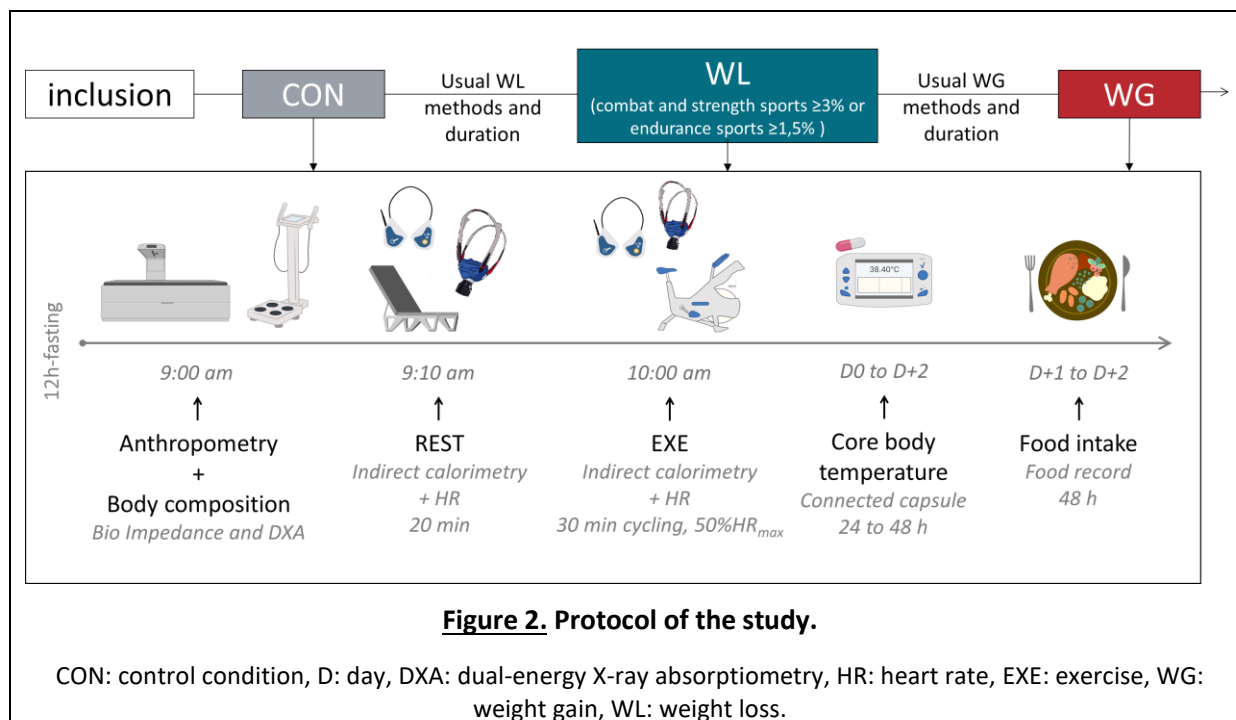
Forty-eight healthy athletes (24.6 ± 5.7 years; 20 females (8 using hormonal contraceptives (HC+)) practicing (11.5 ± 4.6 hours of sports per week) combat ($n = 23$; 11 females), strength ($n = 12$; 5 females), or endurance sports ($n = 13$; 4 females) and used to weight cycle were included (**Figure 1**). Weight cycling was defined as voluntary successive episodes of WL and WG for performance objectives, at least twice per sporting season for the last 2 seasons [16]. Performance objectives included voluntary WL to enter a specific weight category, to optimize power-to-weight ratio or for technical reasons. Due to differences in the types of sport considered and, thus, specific performance objectives, a WL episode was defined as loss of at least 1.5% and 3% for endurance and weight category sport athletes respectively [2,17]. This study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki, and written informed consent was prospectively obtained from all participants. The study protocol was approved by the Nord-Ouest III ethical committee (2019-A00699-48).



2.2. Experimental design

The design of the study is illustrated in **Figure 2**. After a screening visit to confirm eligibility, each athlete came to the laboratory for three identical study visits, on three different occasions: (i) during a period of weight maintenance (*i.e.*, not actively engaged in WL or WG, and with stable body weight for at least 3 weeks) (CON); (ii) at the end of the athletes' habitual period (and percentage) of WL (WL); and (iii) at the end of the recovery, weight (re)gain period (*i.e.*, on a weight regain trajectory approaching or exceeding the initial weight, not stabilized for more than a week and/or before starting the next weight loss phase ; WG). If the weight cycling episode was realized outside of any competitive objectives (*i.e.*, exclusively for the study, n = 23), athletes were requested to lose and regain their habitual amount of body weight, using their habitual strategies (*i.e.*, methods, durations), remaining faithful to their usual weight cycling practices. Athletes systematically informed the investigators of their body weight evolution throughout their participation in the study.

All visits followed an identical protocol, with athletes joining the laboratory in the morning after a 12-hour overnight fast. Anthropometric and body composition measurements were performed before a 20-minute resting cardiometabolic measurement (REST). Athletes were then asked to perform a moderate-intensity cycling exercise on a cycle ergometer (EXE; 30 min at 50% of the theoretical maximal heart rate) with continuous cardiometabolic measurement throughout. At the end of each visit, athletes ingested a telemetric capsule to assess their T_c and were given a food record to complete over the two subsequent days reflecting their current experimental condition (*i.e.*, CON, WL, or WG).



2.3. Anthropometry and body composition

At each experimental visit, body weight and height were measured fasted to the nearest 0.1 kg with a digital scale (Seca model 873 Omega, Germany) and to the nearest 0.1 cm using a wall-mounted stadiometer (Seca model 720, Hamburg, Germany), respectively. Body mass index (BMI) was calculated as body weight (kg) divided by height squared (m^2). Body composition (*i.e.*, FM, FFM, bone mineral content and density) was determined using dual x-ray absorptiometry (DXA, QDR4500A scanner, Hologic, Waltham, MA, USA), and total body water (kg and % of body weight) was assessed *via* multi-frequency bioelectrical impedance (Tanita MC-780 Tanita Corporation, Tokyo, Japan).

2.4. Rapid Weight Loss Questionnaire

Athletes completed the self-reported Rapid Weight Loss Questionnaire (RWLQ) developed by Artioli et al. [17] and validated in French by Pelissier et al. [18]. This questionnaire includes 21 items relating to the athlete's general demographics, competitive level, body weight, diet history, rapid WL behaviors, questioning the influence of other persons on the athlete's WL practice, and the frequency of methods used to achieve WL. An individual score is assigned to each item relative to rapid WL behaviors, and a total rapid WL score is obtained. The higher the score, the more aggressive and harmful the weight management strategy is considered.

2.5. Resting and exercising cardiometabolic assessments

Continuous cardiometabolic measurements were performed across two distinct, consecutive periods during each study visit: (i) for 20 min while fasted, resting in semi-recumbent position, under standardized ambient conditions (quiet room with constant temperature between 19 to 21°C, and relative humidity of 50%) (REST) and (ii) for 30 min during a fasted exercise bout performed on an ergometer at 50% of the theoretical maximal heart rate [19]. During the first experimental visit, the pedaling cadence to achieve the targeted heart rate was recorded for each individual in order to apply a similar cadence (± 5 revolution per minute) during the two other experimental visits (EXE).

Indirect calorimetry with a facemask (MetaMax 3b, Cortex Biophysik, Leipzig, Germany) was used to continuously measure oxygen consumption (VO_2) and dioxide production (VCO_2) during the three experimental visits, with the equipment calibrated according to the manufacturer's recommendations prior to each session. Respiratory quotient (RQ) was calculated as VCO_2/VO_2 and energy expenditure ($kcal.min^{-1}$) as $VO_2 \times$ energy equivalent of oxygen [20]. CHO and lipid oxidation rates were calculated according to the following equations from Péronnet & Massicotte (1991) [20]: $CHO (mg.min^{-1}) = 4.585 VCO_2(ml.min^{-1}) - 3.2255 VO_2(ml.min^{-1})$ and $Lipid (mg.min^{-1}) = 1.6946 VO_2(ml.min^{-1}) - 1.7012 VCO_2 (ml.min^{-1})$. Energy expenditure, CHO and lipid oxidation rates were expressed in absolute values and relative to body weight and FFM. Calculations were performed over a 5-min steady state for REST, and on a 2-min steady state period during each time point of interest for EXE (*i.e.*, 0-10, 11-20 and 21-30 min).

Heart rate was continuously measured throughout REST and EXE conditions using a wireless physiological monitoring system (Polar V800, Polar, Kempele, Finland), and mean heart rate was calculated over the same time point of interest as the energy metabolism variables described above. The percentage of the reserve heart rate during EXE was calculated using the Karvonen formula [21]:

$$\% \text{ reserve heart rate during EXE} = \frac{\text{heart rate during EXE} - \text{heart rate at REST}}{(220 - \text{age}) - \text{heart rate at REST}} \times 100.$$

2.6. Continuous core body temperature monitoring

After each experimental visit, athletes ingested a telemetric capsule system monitoring continuous T_c (e-Celcius® Performance, BodyCap, Caen, France) with a room temperature glass of water [22], following manufacturers' instructions [23]. Temperature data was sampled and transmitted by specific radio frequency every 30 seconds to an external data recorder worn around the athlete's waist. The pill houses an internal memory to avoid missing data in case of transmission failure [23]. To limit variations in temperature related to food or drink ingestion, the initial recording hours (3h for less than 24h recording, or 6h for more) were not considered in the data analyses [24]. Athletes completed activity diaries (*i.e.*, stand, sit, or lying position, inside or outside activities, cold or warm food intake,

bedtime and wake-up time) across the entire time period from ingestion to evacuation of the capsule. Due to the free-living conditions, and to reflect the habitual energy intake and activity of athletes during each condition (CON, WL, WG), it was not possible to better standardize the athletes' activities during this period. Temperature-data outside of the healthy physiological range (35-40°C) were removed [23]. Means were calculated across the total record duration ($T_{c\ 24h}$), the awake ($T_{c\ day}$) and sleeping periods ($T_{c\ night}$), the 30 min before sleeping ($T_{c\ pre-night}$), and the lowest 30 min $T_{c\ night}$ during sleeping ($T_{c\ low\ night}$).

2.7. Daily Energy Intake

Following each experimental visit (*i.e.*, CON, WL, or WG), athletes were asked to complete a 48-hour free-living food record capturing as many details as possible related to the nature and quantity of every food and drink item consumed. If it was not possible to weigh food, athletes were provided with validated reference images from the SUVIMAX study [25] in order to best estimate portion size and weight. Total energy intake and relative macronutrient intake were calculated using the nutrition software for professionals, Nutrilog (Version 3.20, Nutrilog Europe Society, Marans, France).

2.8. Statistical analyses

Statistical analyses were performed using Stata software (version 15; StataCorp, College Station, TX, USA). All tests were two-sided, with an alpha level set at 5%. Categorical data were presented as number and associated percentages and continuous data as mean \pm standard deviation. Weight cycling episode (control, weight loss and weight gain conditions) effect on body weight and composition, core body temperature, resting energy, exercising energy and their substrate metabolism evolution was analyzed as longitudinal data using mixed linear regression models with condition as fixed effect and subject as random effect. These models were then adjusted on sex (p_{sex}) or type of sport (p_{sport}) and an interaction term with the condition. Multiple pairwise comparisons were performed applying a Sidak's type I error correction. Effect sizes and their 95% confidence interval (CI) were calculated from the coefficients and standard errors and from their associated 95% CI of the linear mixed models. In addition, frequencies of "RWLQ" variables were compared between sex and type of sport using Chi squared or Fisher exact tests, or with the Marascuilo procedure for pairwise comparisons.

3. RESULTS

3.1. Athletes' habitual body weight management

The reported habitual sport practices and body weight management strategies of the athletes are detailed in **Table 1**. The 48 athletes started their current sport practice at 14.9 ± 7.2 years old and had been practicing weight cycling for an average of 5.1 ± 3.5 years. Athletes habitual lost 2.9 ± 1.9 kg per WL episode, representing $4.5 \pm 2.9\%$ of their initial, pre-WL (CON) body weight. A significant effect of type of sport was observed ($p_{\text{sport}} = 0.003$) with lower habitual WL in endurance athletes ($2.8 \pm 1.2\%$) than in combat ($4.5 \pm 1.7\%$) and strength athletes ($6.1 \pm 4.9\%$). The most common WL strategies employed were increased exercise (89.4%) and gradual dieting (78.7%), skipping meals (46.8%), restricting fluids (44.7%), and sauna (42.6%). The RWLQ score of strength athletes was significantly lower than that of combat athletes, but higher than endurance athletes ($p_{\text{sport}} < 0.001$).

Table 1. Usual sport practice and body weight management of athletes.

	Total	Sport			Sex	
		Combat	Strength	Endurance	Males	Females
Sample size (N)	48	23	12	13	28	20
Age (years)	24.6 ± 5.7	23.0 ± 3.9	26.1 ± 5.4	26.0 ± 7.9	25.7 ± 5.9	23.0 ± 5.0
Age started sport (years)	14.9 ± 7.2	11.3 ± 6.8	22.1 ± 4.7 ^{aaa}	14.8 ± 4.3 ^{bb}	15.2 ± 6.3	14.2 ± 8.2
Training volume (h/week)	11.5 ± 4.6	10.8 ± 5.1	11.6 ± 4.0	12.7 ± 4.4	11.1 ± 5.3	11.7 ± 4.2
WL practice for competition (years)	5.1 ± 3.5	5.3 ± 3.4	5.0 ± 3.3	4.9 ± 4.1	5.0 ± 4.1	4.8 ± 2.8
Usual WL duration (d)	26.6 ± 25.3	17.4 ± 15.7	40.1 ± 39.0	32.0 ± 18.5	24.5 ± 23.0	29.6 ± 28.5
Usual WL (kg)	2.9 ± 1.9	3.0 ± 1.0	4.0 ± 3.1	1.7 ± 0.8 ^{aa,b}	3.1 ± 1.8	2.8 ± 2.0
Usual WL (%)	4.5 ± 2.9	4.5 ± 1.7	6.1 ± 4.9	2.8 ± 1.2 ^a	4.4 ± 2.3	4.7 ± 3.6
Usual WL methods*						
Gradual dieting	78.7%	82.6%	72.7%	76.9%	74.1%	85.0%
Skipping one or two meals	46.8%	60.9%	45.5%	23.1%	48.1%	45.0%
Fasting	34.0%	47.8%	45.5%	0.0% ^{a,b}	29.6%	40.0%
Restricting fluids	44.7%	60.9%	63.6%	0.0% ^{a,b}	40.7%	50.0%
Increased exercise	89.4%	91.3%	90.9%	84.6%	88.9%	90.0%
Heated training rooms	23.4%	39.1%	9.1%	7.7% ^a	22.2%	25.0%
Sauna	42.6%	56.5%	54.5%	7.7% ^{a,b}	40.7%	45.0%
Training with rubber/plastic suits	29.8%	56.5%	9.1% ^a	0.0% ^a	29.6%	30.0%
Using insulated or plastic suits	14.9%	26.1%	9.1%	0.0% ^a	7.4%	25.0%
Spitting	2.1%	4.3%	0.0%	0.0%	3.7%	0.0%
Laxatives	6.4%	8.7%	9.1%	0.0%	3.7%	10.0%
Diuretics	4.3%	8.7%	0.0%	0.0%	7.4%	0.0%
Diet pills	2.1%	4.3%	0.0%	0.0%	0.0%	5.0%
Vomiting	2.1%	4.3%	0.0%	0.0%	3.7%	0.0%
RWLQ score	26.0 ± 13.4	35.2 ± 9.6	23.5 ± 10.4 ^{aa}	12.1 ± 6.0 ^{aaa,bb}	25.3 ± 13.2	27.1 ± 13.6
Usual WG 1 week after competition (kg)	1.6 ± 1.1	2.2 ± 1.0	1.4 ± 1.3 ^a	0.8 ± 0.6 ^{aaa}	1.7 ± 1.2	1.4 ± 1.1

*Usual WL methods correspond to the rate of the sample size who answered 'always' and 'sometimes' to the RWLQ. Results range from 0% (red) to 100% (blue).

Statistical difference with combat sport: a: $p < 0.05$, aa: $p < 0.01$, aaa: $p < 0.001$. Statistical difference with strength sport: b: $p < 0.05$, bb: $p < 0.01$.

RWLQ: Rapid Weight Loss Questionnaire, WG: weight gain, WL: weight loss.

3.2. Energy intake, body weight and composition changes in response to an episode of weight loss and regain in athletes

As detailed in **Table S1**, energy intake transiently decreased during WL ($p < 0.001$), mirrored by a decrease in absolute macronutrient intakes ($p < 0.001$), before returning to baseline (CON) values.

Body weight and composition changes are illustrated in **Figure 3** and detailed in **Table S1** with effect size in **Figure S1**. Athletes significantly lost, on average, 3.0 ± 1.6 kg ($4.4 \pm 2.3\%$) of their initial body weight, within 37.2 ± 29.8 days ($p_{\text{sport}} < 0.001$), and regained, on average, 2.9 ± 1.6 kg ($4.5 \pm 2.9\%$) after 49.4 ± 42.5 days ($p_{\text{sport}} < 0.001$). These body weight variations were mirrored by significant FM and FFM losses and (re)gains to baseline (CON) values. Endurance athletes regained significantly more FM during the WG period than combat athletes ($+5.6 \pm 7.5\%$ vs. $-7.3 \pm 11.3\%$, respectively; $p = 0.004$), who had not returned to their initial FM at the completion of the WG period.

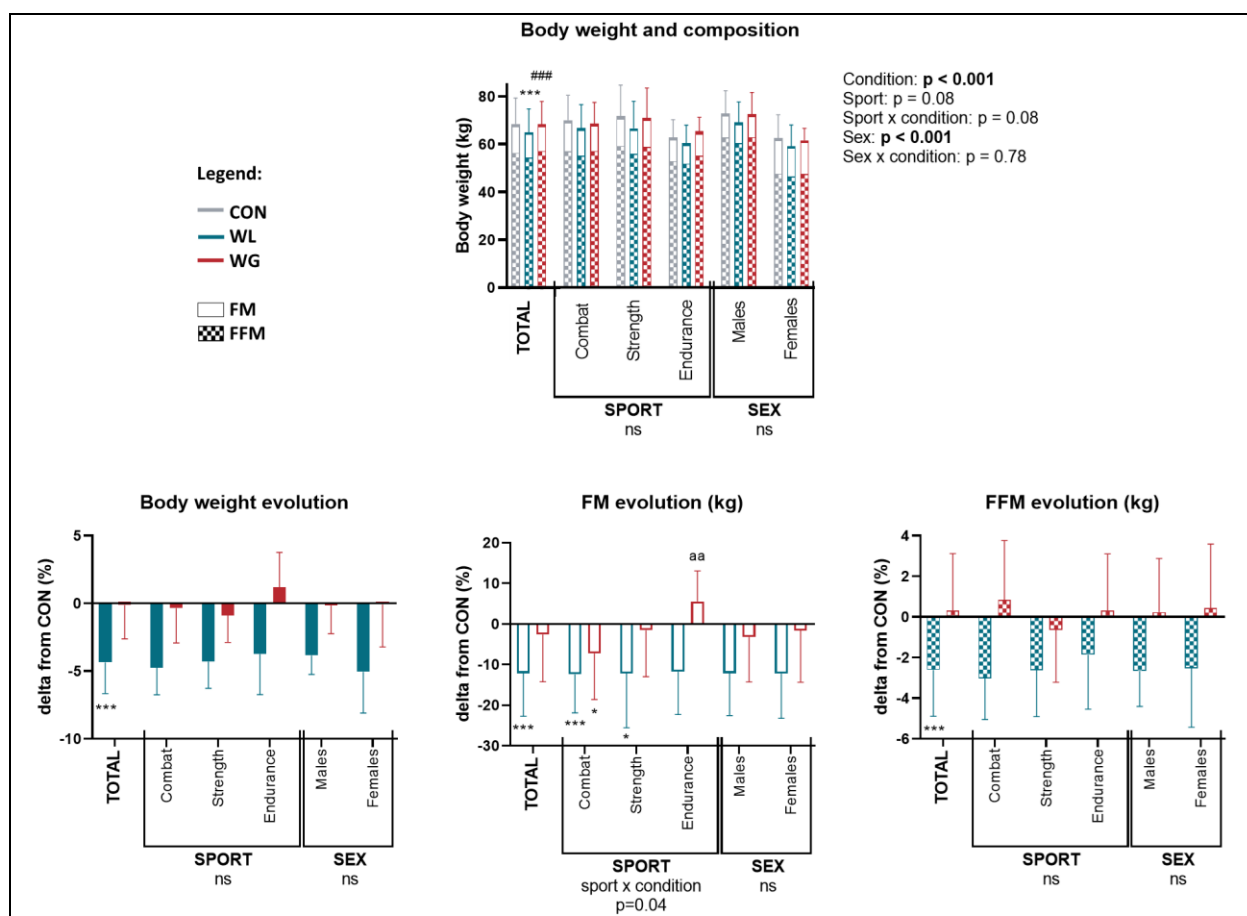


Figure 3. Body weight and composition evolution in response to a weight cycling episode in athletes.

Condition effect:

Significant difference from CON: * : $p < 0.05$, ***: $p < 0.001$

Significant difference from WL: ###: $p < 0.001$

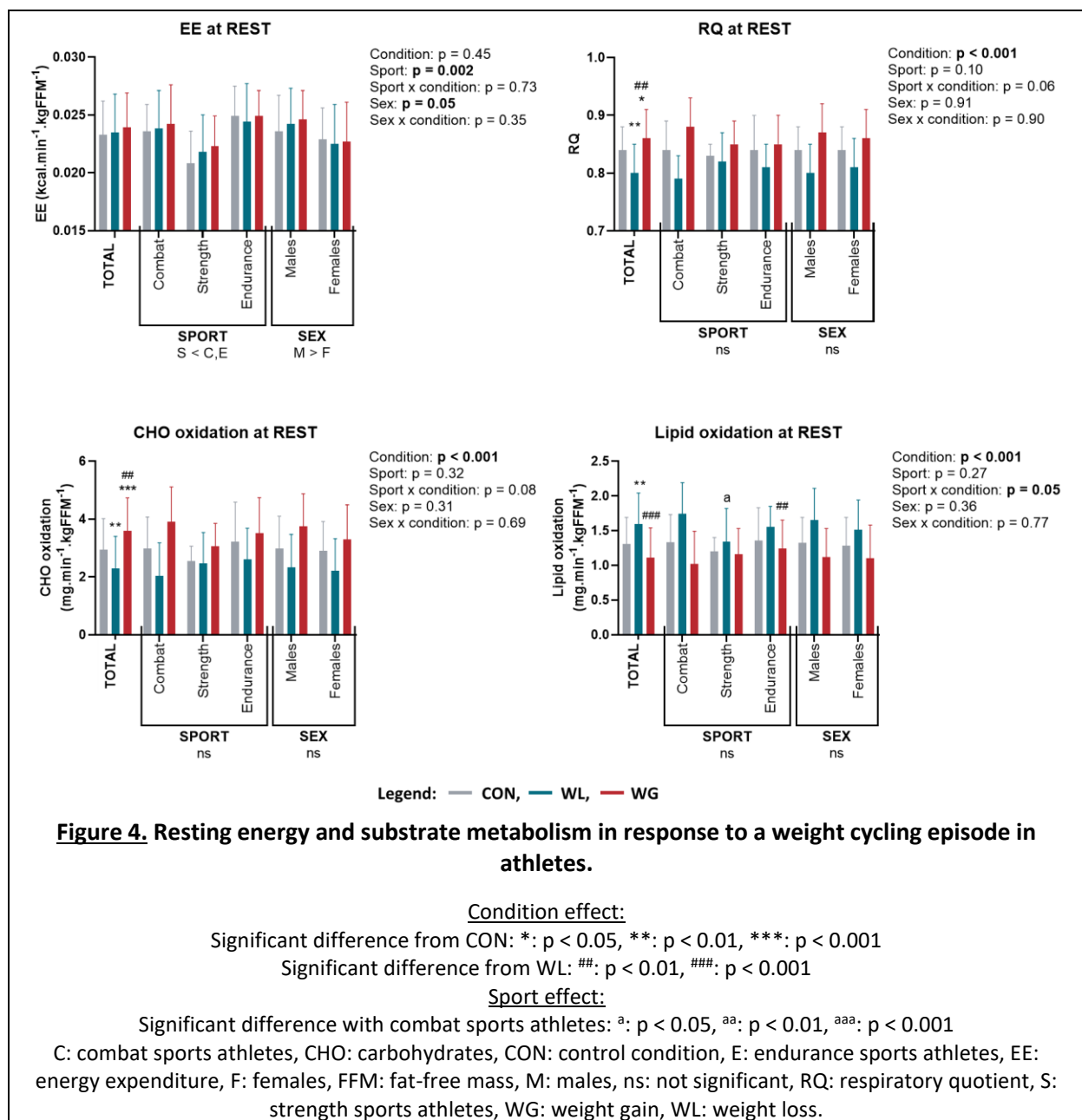
Sport effect:

Significant difference with combat sports athletes: ^{aa}: $p < 0.01$

CON: control condition, FFM: fat-free mass, FM: fat mass, ns: not significant, WG: weight gain, WL: weight loss.

3.4. Resting cardiometabolic changes in response to an episode of weight loss and regain in athletes

Cardiometabolic responses during REST (absolute and relative to FFM) are detailed in **Table S2**, with the effect sizes presented in **Figure S1**. Energy expenditure and substrate oxidation relative to FFM are illustrated in **Figure 4**. Overall, while absolute energy expenditure was significantly higher during WG than WL ($p = 0.05$), no condition effect was observed when values were related to FFM. Independently of the condition, strength athletes had a lower relative energy expenditure than combat and endurance athletes ($p_{\text{sport}} = 0.002$), and males had a greater absolute and relative energy expenditure than females ($p_{\text{sex}} < 0.001$ and $p_{\text{sex}} = 0.05$, respectively). RQ was significantly lower during the WL, and higher during the WG, than during the CON condition for all groups ($p < 0.001$). This was mirrored by a lower absolute and relative CHO and higher lipid oxidation during WL, and a greater CHO oxidation during WG than CON. The significant sport x condition interaction effect for absolute and relative lipid oxidation ($p = 0.04$ and $p = 0.05$, respectively) highlighted a greater lipid utilization during WG than WL in endurance athletes, which was not observed in combat or strength athletes. Heart rate was significantly lower during WL ($p = 0.001$), before returning to baseline (CON) values after WG.



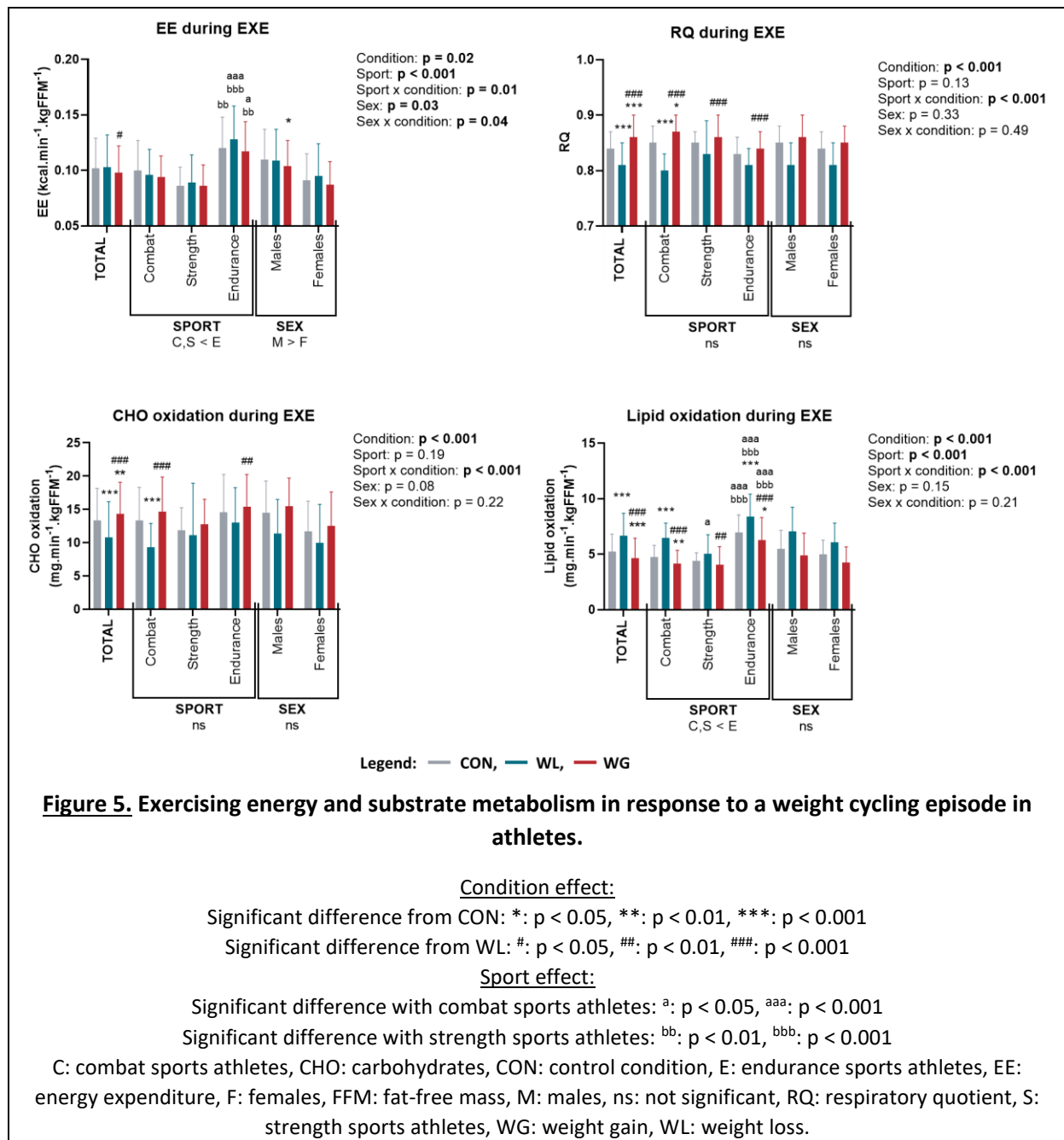
3.5. Exercising cardiometabolic changes in response to an episode of weight loss and regain in athletes

Cardiometabolic responses (absolute and relative to FFM) during EXE are detailed in **Table S3** with effect sizes per group displayed in **Figure S1**. Energy expenditure and substrate oxidation relative to FFM are illustrated in **Figure 5**. Since no condition x time interaction was observed during exercise (*i.e.*, 10min, 20min, and 30min of exercise; $p > 0.05$, data not shown), results are presented for the entire EXE period. Energy expenditure relative to FFM was higher during WG than during WL ($p = 0.02$) with significant sport ($p_{\text{sport}} < 0.01$) and sex ($p_{\text{sex}} = 0.03$) effects. The significant sport x condition interaction

($p = 0.01$) highlighted a higher relative energy expenditure in endurance athletes than strength athletes during CON, WL, and WG; and than combat athletes during WL and WG. The significant sex x condition interaction ($p = 0.04$) highlighted a lower energy expenditure relative to FFM during WG than CON in males, while no differences were observed in females.

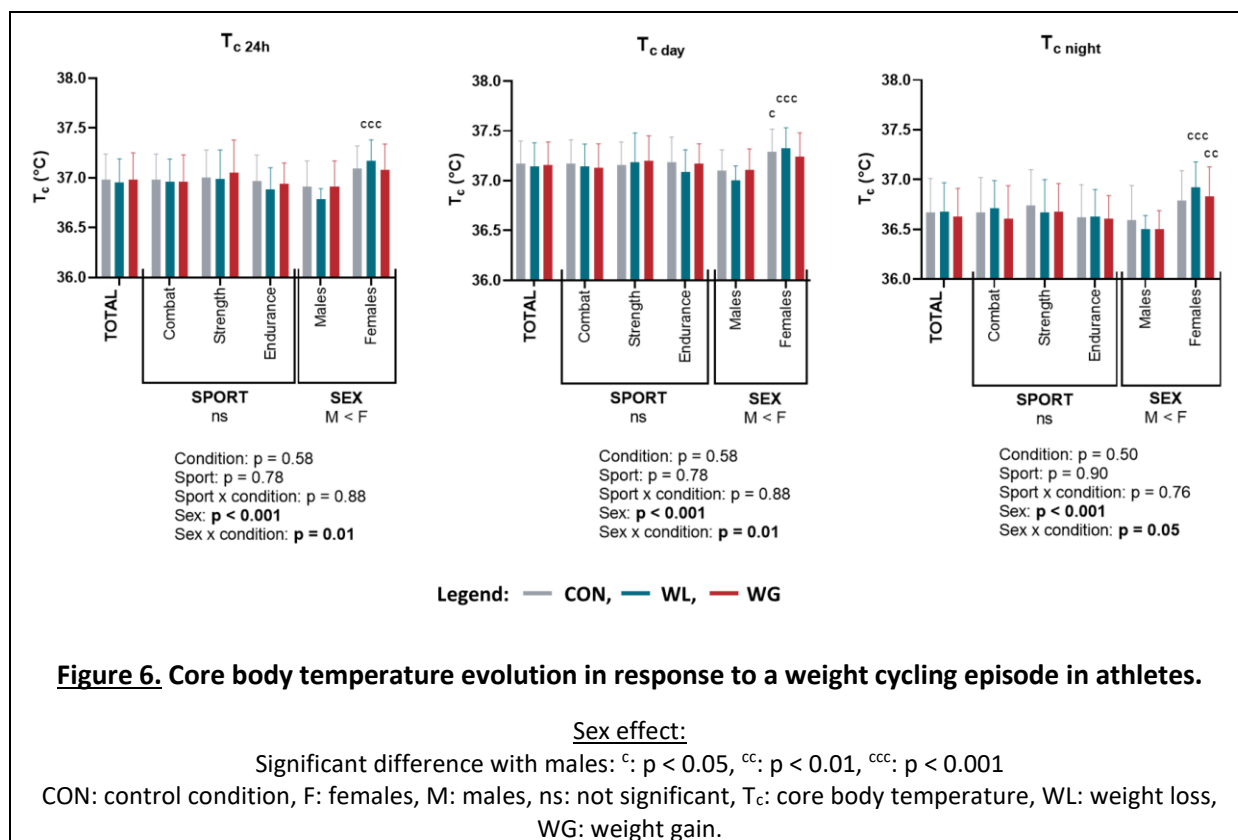
Overall, RQ was significantly lower during WL, and higher during WG, than during CON ($p < 0.001$), with a significant sport x condition interaction observed ($p < 0.001$). This was reflected by significantly increased absolute and relative lipid oxidation during WL followed by a significant decrease during WG, to below CON values, and *vice versa* for CHO use. A significant sport x condition interaction ($p < 0.001$) was observed for absolute and relative substrate oxidation rates, reflecting that the significant changes observed in the total cohort were also observed in combat sports athletes. However, there was no change in CHO oxidation rate in strength athletes with body weight change and in endurance athletes during WL when compared with CON, and no change in lipid oxidation rate in strength athletes during WL when compared with CON (see **Table S3** and **Figure 5** for details).

While the reserve heart rate increased during WL before returning to its baseline (CON) value after WG, related to the decrease in resting heart rate, no condition nor group effect was observed during EXE. As well, no effect was observed for the percentage of reserve heart rate (CON: $30.7 \pm 5.4\%$, WL: $32.1 \pm 5.1\%$, WG: $30.3 \pm 5.4\%$, $p = 0.20$).



3.6. Core body temperature changes in response to an episode of weight loss and regain in athletes

Core body temperature outcomes are illustrated in **Figure 6** and detailed in **Table S4** with effect size in **Figure S1**. No condition effect was observed. Males presented a lower T_c than females ($p_{sex} < 0.001$). A significant sex x condition interaction was observed for all T_c outcomes, except $T_{c\ low\ night}$ ($p = 0.09$). An increased T_c was observed in females while it decreased in males after WL ($T_{c\ 24h}$: $p = 0.01$, $T_{c\ day}$: $p = 0.01$, $T_{c\ night}$: $p = 0.05$, $T_{c\ pre-night}$: $p = 0.01$).



4. DISCUSSION

While energy metabolism adaptations to WL have been observed in both normal-weight and people with overweight and obesity, placing them at risk for subsequent, excess WG and increased cardiometabolic comorbidities [26], such consequences of weight variations in weight cycling athletes remain unclear [7]. The present study appears to be the first detailed evaluation of the energy metabolism adaptations to an effective, entire episode of weight cycling in such athletes, considering the potential implications of the type of practiced sport and the sex of the athletes.

Firstly, the present results do not support extrapolation of the proposed body weight or fat overshoot observed in non-athlete individuals showing large weight losses [27] to the athletic population showing more modest weight losses. The results are thus consistent with the semistarvation-refeeding study of Muller et al. where no catch-up fat or fat overshoot was observed in response to weight loss (-6 kg) in non-athletes [26]. Indeed, at the cohort level, there was no evidence of higher body weight or FM after WG compared with baseline (CON) values. Importantly, weight cycling athletes self-reported to do not interrupt their training regimes after an episode of WL (although the training volume might be reduced

after a competition for physical recovery purposes), thus maintaining a high physical activity level throughout both the WL and WG periods. Moreover, compared with non-athletes, the acknowledged dietary and nutritional control in athletes may alleviate subconscious autoregulatory hyperphagia and may also partly explain the absence of adiposity rebound in physically-active individuals [7,8]. While no condition x sex interaction was observed in the present study, suggesting similar responses in both male and female athletes, our results indicate an effect of the type of sport performed (marginal difference). Interestingly, combat athletes did not regain their initial FM after WG, despite full restoration of FFM, while endurance athletes tended to regain significantly more FM than combat athletes. Although not statistically significant, the higher absolute FM after WG compared to CON may suggest a risk for a potential fat-overshoot in endurance athletes, and hence a longer-term study is needed to confirm this assumption. The discrepancies observed between combat and endurance athletes might be explained by differences in the degree, duration, and strategies of WL between these two athlete groups, with combat athletes engaging in more drastic and rapid WL (mean WL rate: $-372.0 \pm 448.1 \text{ g}\cdot\text{day}^{-1}$ for 25.0 ± 23.7 days), mainly centered around active dehydration a few hours/days before their official weight-in [8,28]. Conversely, endurance athletes tended to undergo a lower degree of WL over a longer period (mean WL rate: $-54.0 \pm 37.8 \text{ g}\cdot\text{day}^{-1}$ for 49.9 ± 24.0 days) and not based on dehydration but instead largely centered on increasing training volume (**Table 1**). Such results may also reinforce the hypothesis that energy partitioning between lean and fat compartments during WL presents a plausible explanation for a greater FM regain during recovery in endurance athletes [27]. Indeed, although not significant in our study, endurance athletes have less initial FM (endurance: $9.0 \pm 3.3 \text{ kg}$, $14.1 \pm 5.0\%$ vs. combat: $12.3 \pm 5.3 \text{ kg}$, $17.2 \pm 6.4\%$ vs. strength: $11.5 \pm 2.2 \text{ kg}$, $16.2 \pm 4.8\%$) and did not significantly lose FM (kg) during WL as compared to other athletes. As previously described, leaner individuals may lose more FFM (% of the weight lost) during WL compared to those with higher adiposity [29]. This can increase their risk of subsequent FM accumulation during weight recovery, which may partly explain the marginal difference in FM gain in endurance athletes compared to others observed in the present study [27,29,30].

Complementary to the evolution of body composition, metabolic adaptations have also been reported during WL, which may persist during weight recovery, resulting in fat being recovered faster than FFM, with the deficit in FFM sustaining hyperphagia beyond complete fat recovery until all FFM is recovered, and in the process leads to excess fat deposition and fat overshooting; a process referred to as 'collateral fattening' [30]. Indeed, adaptive thermogenesis (*i.e.*, greater than predicted change in resting energy expenditure in response to body weight and tissue-specific loss) [31], has often been observed in non-athletic cohorts and those with overweight and obesity engaged in WL practices, leading to a thrifty metabolism [6,26,31] and which may persist to drive catch-up fat during weight

regain (6). Interestingly, in both REST and EXE conditions, our results fail to show any modification of the athletes' energy expenditure relative to FFM, suggesting then an absence of energy expenditure adaptation through an episode of weight cycling in athletes when FFM loss is considered. This seems to corroborate previously published studies conducted in this population with similar WL [11,32,33]. Conversely, in their work, Isola et al. observed the presence of adaptive thermogenesis among bodybuilders in response to an approximate WL of 14% in 23 weeks accompanied by a drastic FM loss of 70% [9]. Importantly, this adaptation was transient as returned to baseline values 23 weeks after weight recovery, in line with the athletes' refeeding and FM and FFM restoration. Taken together, these results suggest the importance of not only the degree of WL, but also the FM loss in the activation of the adipose-specific control of adaptive thermogenesis [34]. While the present study intentionally observed athletes during their habitual WL practices (*i.e.*, strategies, degree, duration), FM depletion remained in the healthy range [35] and might therefore have been too modest to induce such adaptations. As observed by Nunes et al. in former athletes, lower body weight loss and FM depletion may be related to greater energy expenditure conservation [36].

Considering the whole sample, a transiently increased lipid and decreased CHO oxidation rate in response to WL, both at rest and during exercise, highlights substrate use adjustments in line with decreased body weight and energy intake [13]. This transient shift in substrate oxidation with reduced CHO oxidation has also been observed in previous studies [9,10]. The increased training volume, quantified according the athlete self-reports, and the decreased total energy and CHO intake during WL (**Tables 1 and S1**) may have induced lower glycogen store during WL leading to lower insulin (*i.e.*, most important hormone that inhibits lipolysis) and higher glucagon levels [10]. Sagayama et al. observed similar results in male boxers after a 6% rapid WL and suggested that an increased expression of pyruvate dehydrogenase kinase 4 may suppress CHO oxidation and enhance lipid oxidation during WL [10]. In the present study, during WG, CHO oxidation was higher at rest and during exercise, and lipid oxidation was lower during exercise, meaning that the substrate shift during body weight recovery may have partly contributed to the adipose tissue restoration. Interestingly, exercise lipid utilization in endurance athletes was higher than in other sports during the entire weight cycling episode. It has been reported that despite having intramyocellular lipid content similar to that observed in individuals with insulin-resistant obesity or type 2 diabetes, endurance-trained athletes demonstrate high insulin sensitivity and oxidative capacity, a phenomenon known as the "endurance athlete's paradox" [37,38]. Therefore, intramyocellular lipid content is an important substrate source during moderate exercise (as performed in the present study) in endurance-trained athletes, especially in the fasted state [38,39]. It may therefore be hypothesised that the difference in the preferential lipid source use (*i.e.*, intramyocellular lipid and plasma-free fatty acid) between athletes (endurance vs. other sports) [40]

may have been a factor contributing to the absence of significant FM loss observed in endurance athletes during WL. Additionally, the self-reported lowered physical activity volume in body weight recovery (*i.e.*, weight regain) compared to the WL phase, especially in endurance athletes as previously suggested [41,42], may contribute to a potential risk of collateral fattening in endurance athletes during WG persisting until FFM is fully restored. However, these hypotheses need further longer-term and cellular investigations in order to be confirmed.

As part of these compensatory mechanisms to WL, thermoregulatory adaptations play an important role in physiological homeostasis. While highly challenging, the continuous measurement of T_c during and in response to an entire weight cycling episode in weight cycling athletes has been performed for the first time in the present work, thanks to telemetry-based devices [43]. According to our results, T_c remains unchanged after WL and WG compared to baseline, without any effect of sports type, showing no apparent thermoregulation adaptation in this specific population. Using an animal model and similar technology, Calonne et al. previously observed a reduced energy cost of homeothermy in response to caloric restriction that persists during WG. The authors emphasized that a lower core body temperature constitutes a thrifty metabolic phenotype that contributes to the high metabolic efficiency driving catch-up fat during WG [43]. Also still rare, some previous studies conducted among patients with overweight and obesity observed a reduction of T_c during WL, characterizing it as a long-term energy efficiency response, mostly driven by caloric restriction rather than exercise and body composition [44,45]. Moreover, these results were obtained in response to a higher degree of WL than the present study (*i.e.*, at least 10%). Overall, these results suggest that the modest and shorter WL induced in this study, also relying on physical exercise, and dehydration for some athletes, might explain the lack of such observed thermoregulatory mechanisms [46], which might in turn explain, at least in part, the absence of decreased energy expenditure during WL and WG.

Although the present results indicate the role of sport type on energetic adaptations to weight cycling, they fail to show any clear sexual dimorphism, with the exception of a lower energy expenditure relative to FFM during exercise in WG compared to baseline in males only. As suggested in previous studies, the sexual dimorphism in metabolic responses commonly observed in non-athlete individuals tends to be alleviated in athletes due to training adaptations [9,47,48]. However, the opposite T_c variations observed in females (increase) compared to males (decrease) in response to WL may suggest a sexual dimorphism that needs to be explored in further studies particularly, in regards to ovarian hormonal status due to the purported influence of sex hormone fluctuations on T_c [49].

Strength, limitations, and perspectives

Our study is the first to investigate the influence of an entire WL and WG cycle on body composition, T_c and energy metabolism in male and female athletes, used to weight cycling, across three different types of sports. Although the inclusion of endurance athletes brings new evidence in this area, their specific profile might require more focused attention, and comparisons with other sports remain limited. Indeed, as they chronically maintain a relatively low body weight and FM throughout the sports season with a chronic low energy availability, the effective WL is significantly lower in endurance athletes than in weight-category sports [50]. Methodologically, the present work proposes an integrative approach to monitor thermoregulation, considered to be the best way to continuously and non-invasively track core body temperature under ecological conditions, but which in turn prevented strict standardization of participant activity [23]. Similarly, although the use of DXA scans to assess body composition is a strength of this work, the use of bioelectrical impedance to assess hydration might also be a limitation that might explain the surprisingly higher percentage of hydration after WL compared to baseline and WG despite the use of standardized measurement conditions (fasting, bladder voided). While overhydration of FFM is often reported during WL in non-athletes [51], this does not seem coherent with the WL strategies used by some athletes to achieve rapid WL (60.9% of combat and 63.6% of strength athletes restricting fluids and sauna being used by 56.5% and 54.5%, respectively). In addition, it is well recognized that a greater loss of water, due to diminished glycogen stores, occur in the first kilogram of body weight lost [52]. Thus, a more reliable method, such as assessment of urinary specific gravity is most commonly used in studies focussing on hydration status [53]. Some athletes in the present study underwent the WL visit two days before their official competition weigh-in (aligned with their availability), thus preceding the period of “water cut” (dehydration method involving restricted fluid intake and excessive sweating), typically carried out a few hours before weigh-in. Finally, there are differences between the self-declared habitual percentage of WL and the degree of WL achieved by athletes in the present study. This may be due to the bias in self-reported information and/or difficulty to achieve habitual WL for those who simulated their habitual WL practices for the purpose of this study, rather than being assessed in the context of actual competition.

Importantly, as previously mentioned, the ovarian hormonal status of the female athletes could not be controlled as the WL and WG achievement periods were the main objective of the present work and therefore it was not possible to match these objectives with menstrual phases. Thus, the hypothesis presented, of ovarian hormonal status as a potential explanation for the differences in T_c observed between males and females, remains speculative and needs to be further explored, being of importance for providing new insights in the area of female physiology and metabolism.

5. CONCLUSION

To conclude, no body weight, fat overshoot, or reduced energy expenditure (at rest and during exercise), were observed after a cycle of WL and WG among weight cycling athletes, likely due to a low degree of WL and a high training volume throughout the weight cycling episode. The type of sport practiced does however appear to influence cycle outcomes, with endurance athletes being potentially predisposed to experience a fat overshooting. In addition, while no clear sexual dimorphism could be observed in this study, the present results encourage further investigations, with specific emphasis on exploring the role hormonal status on the effects of weight cycling in athletes.

Acknowledgments: The authors thank the athletes who volunteered in this study.

Author Contribution: Conceptualisation and design of the study: LI, DT, JMC, AD, MD; Data collection: SB, LI; Data analysis: IR, SB; Writing of the manuscript: SB; Reviewing and editing of manuscript: YB, JMC, AD, MD, AH, LI, DT. All authors read and approved the final version of the manuscript.

Fundings: This work was supported by the French “Plan de Relance” fund from the National Research Agency (ANR) and the International Research Chair Health in Motion.

Competing Interests: No competing interests to declare.

REFERENCES

- [1] Pettersson S, Pipping Ekström M, Berg CM. The food and weight combat. A problematic fight for the elite combat sports athlete. *Appetite* 2012;59:234–42. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2012.05.007>.
- [2] Sedeaud A, Marc A, Marck A, Dor F, Schipman J, Dorsey M, et al. BMI, a Performance Parameter for Speed Improvement. *PLOS ONE* 2014;9:e90183. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090183>.
- [3] Brechney GC, Cannon J, Goodman SP. Effects of Weight Cutting on Exercise Performance in Combat Athletes: A Meta-Analysis. *Int J Sports Physiol Perform* 2022;17:995–1010. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2021-0104>.
- [4] Saarni SE, Rissanen A, Sarna S, Koskenvuo M, Kaprio J. Weight cycling of athletes and subsequent weight gain in middleage. *Int J Obes (Lond)* 2006;30:1639–44. <https://doi.org/10.1038/sj.ijo.0803325>.
- [5] Keys A, Brozek J, Henschel A, Mickelsen O, Taylor H. *The Biology of Human Starvation. Vols I-II.* University of Minnesota Press, Minneapolis, MN. 1950.
- [6] Dulloo AG. Physiology of weight regain: Lessons from the classic Minnesota Starvation Experiment on human body composition regulation. *Obesity Reviews* 2021;22:e13189. <https://doi.org/10.1111/obr.13189>.
- [7] Miles-Chan JL, Isacco L. Weight cycling practices in sport: A risk factor for later obesity? *Obes Rev* 2021;22 Suppl 2:e13188. <https://doi.org/10.1111/obr.13188>.
- [8] Bagot S, Pélissier L, Pereira B, Chanséaume Bussiere E, Duclos M, Dulloo A, et al. Weight regain, body composition, and metabolic responses to weight loss in weight cycling athletes: A systematic review and meta-analyses. *Obes Rev* 2023:e13658. <https://doi.org/10.1111/obr.13658>.
- [9] Isola V, Hulmi JJ, Petäjä P, Helms ER, Karppinen JE, Ahtiainen JP. Weight loss induces changes in adaptive thermogenesis in female and male physique athletes. *Appl Physiol Nutr Metab* 2023:apnm-2022-0372. <https://doi.org/10.1139/apnm-2022-0372>.
- [10] Sagayama H, Yoshimura E, Yamada Y, Tanaka H. The effects of rapid weight loss and 3-h recovery on energy expenditure, carbohydrate, and fat oxidation in boxing athletes. *J Sports Med Phys Fitness* 2019;59:1018–25. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.18.08677-2>.
- [11] Sagayama H, Yoshimura E, Yamada Y, Ichikawa M, Ebine N, Higaki Y, et al. Effects of rapid weight loss and regain on body composition and energy expenditure. *Appl Physiol Nutr Metab* 2014;39:21–7. <https://doi.org/10.1139/apnm-2013-0096>.
- [12] Conlin LA, Aguilar DT, Rogers GE, Campbell BI. Flexible vs. rigid dieting in resistance-trained individuals seeking to optimize their physiques: A randomized controlled trial. *J Int Soc Sports Nutr* 2021;18:52. <https://doi.org/10.1186/s12970-021-00452-2>.
- [13] Lebron MA, Stout JR, Fukuda DH. Physiological Perturbations in Combat Sports: Weight Cycling and Metabolic Function—A Narrative Review. *Metabolites* 2024;14:83. <https://doi.org/10.3390/metabo14020083>.
- [14] Wells JCK. Sexual dimorphism of body composition. *Best Pract Res Clin Endocrinol Metab* 2007;21:415–30. <https://doi.org/10.1016/j.beem.2007.04.007>.
- [15] Landsberg L. Core temperature: a forgotten variable in energy expenditure and obesity? *Obesity Reviews : An Official Journal of the International Association for the Study of Obesity* 2012;13 Suppl 2:97–104. <https://doi.org/10.1111/j.1467-789X.2012.01040.x>.
- [16] Silva Santos JF da, Takito MY, Artioli GG, Franchini E, Santos JF da S, Takito MY, et al. Weight loss practices in Taekwondo athletes of different competitive levels. *J Exerc Rehabil* 2016;12:202–8. <https://doi.org/10.12965/jer.1632610.305>.
- [17] Artioli GG, Scagliusi F, Kashiwagura D, Franchini E, Gualano B, Junior AL. Development, validity and reliability of a questionnaire designed to evaluate rapid weight loss patterns in judo

- players. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 2010;20:e177-87. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2009.00940.x>.
- [18] Pélissier L, Ennequin G, Bagot S, Pereira B, Lachèze T, Duclos M, et al. Lightest weight-class athletes are at higher risk of weight regain: results from the French-Rapid Weight Loss Questionnaire. *Phys Sportsmed* 2023;51:144–52. <https://doi.org/10.1080/00913847.2021.2014285>.
- [19] Fox SM, Naughton JP. Physical activity and the prevention of coronary heart disease. *Prev Med* 1972;1:92–120. [https://doi.org/10.1016/0091-7435\(72\)90079-5](https://doi.org/10.1016/0091-7435(72)90079-5).
- [20] Péronnet F, Massicotte D. Table of nonprotein respiratory quotient: an update. *Can J Sport Sci* 1991;16:23–9.
- [21] Yabe H, Kono K, Onoyama A, Kiyota A, Moriyama Y, Okada K, et al. Predicting a target exercise heart rate that reflects the anaerobic threshold in nonbeta-blocked hemodialysis patients: The Karvonen and heart rate reserve formulas. *Ther Apher Dial* 2021;25:884–9. <https://doi.org/10.1111/1744-9987.13628>.
- [22] Bongers CCWG, Daanen HAM, Bogerd CP, Hopman MTE, Eijsvogels TMH. Validity, Reliability, and Inertia of Four Different Temperature Capsule Systems. *Med Sci Sports Exerc* 2018;50:169–75. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001403>.
- [23] Monnard CR, Fares E-J, Calonne J, Miles-Chan JL, Montani J-P, Durrer D, et al. Issues in Continuous 24-h Core Body Temperature Monitoring in Humans Using an Ingestible Capsule Telemetric Sensor. *Front Endocrinol* 2017;8. <https://doi.org/10.3389/fendo.2017.00130>.
- [24] Roxane B, Ouma Chandrou K, Pierre Alexandre C, Christophe C, Bruno S, Stéphane B, et al. Gastrointestinal thermal homogeneity and effect of cold water ingestion. *Journal of Thermal Biology* 2018;78:204–8. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.10.002>.
- [25] Julia C, Méjean C, Touvier M, Péneau S, Lassale C, Ducrot P, et al. Validation of the FSA nutrient profiling system dietary index in French adults-findings from SUVIMAX study. *Eur J Nutr* 2016;55:1901–10. <https://doi.org/10.1007/s00394-015-1006-y>.
- [26] Müller MJ, Enderle J, Pourhassan M, Braun W, Eggeling B, Lagerpusch M, et al. Metabolic adaptation to caloric restriction and subsequent refeeding: the Minnesota Starvation Experiment revisited. *Am J Clin Nutr* 2015;102:807–19. <https://doi.org/10.3945/ajcn.115.109173>.
- [27] Dulloo AG, Jacquet J, Montani J-P, Schutz Y. How dieting makes the lean fatter: from a perspective of body composition autoregulation through adipostats and proteinstats awaiting discovery. *Obesity Reviews : An Official Journal of the International Association for the Study of Obesity* 2015;16 Suppl 1. <https://doi.org/10.1111/obr.12253>.
- [28] Štangar M, Štangar A, Shtyrba V, Cigić B, Benedik E. Rapid weight loss among elite-level judo athletes: methods and nutrition in relation to competition performance. *Journal of the International Society of Sports Nutrition* 2022;19:380–96. <https://doi.org/10.1080/15502783.2022.2099231>.
- [29] Forbes GB. Lean body mass-body fat interrelationships in humans. *Nutr Rev* 1987;45:225–31. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.1987.tb02684.x>.
- [30] Dulloo AG, Miles-Chan JL, Schutz Y. Collateral fattening in body composition autoregulation: its determinants and significance for obesity predisposition. *Eur J Clin Nutr* 2018;72:657–64. <https://doi.org/10.1038/s41430-018-0138-6>.
- [31] Nunes CL, Casanova N, Francisco R, Bosy-Westphal A, Hopkins M, Sardinha LB, et al. Does adaptive thermogenesis occur after weight loss in adults? A systematic review. *Br J Nutr* 2022;127:451–69. <https://doi.org/10.1017/S0007114521001094>.
- [32] McCargar LJ, Crawford SM. Metabolic and anthropometric changes with weight cycling in wrestlers. / Modifications métaboliques et anthropométriques du fait des séquences de musculation chez les lutteurs. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 1992;24:1270–5.
- [33] Brewer PE. Weight cycling in competitive judokas. University of British Columbia, 1992. <https://doi.org/10.14288/1.0086677>.

- [34] Dulloo AG, Jacquet J. Adaptive reduction in basal metabolic rate in response to food deprivation in humans: a role for feedback signals from fat stores. *Am J Clin Nutr* 1998;68:599–606. <https://doi.org/10.1093/ajcn/68.3.599>.
- [35] Friedl KE, Moore RJ, Martinez-Lopez LE, Vogel JA, Askew EW, Marchitelli LJ, et al. Lower limit of body fat in healthy active men. *Journal of Applied Physiology* 1994;77:933–40. <https://doi.org/10.1152/jappl.1994.77.2.933>.
- [36] Nunes CL, Jesus F, Francisco R, Hopkins M, Sardinha LB, Martins P, et al. Effects of a 4-month active weight loss phase followed by weight loss maintenance on adaptive thermogenesis in resting energy expenditure in former elite athletes. *Eur J Nutr* 2022;61:4121–33. <https://doi.org/10.1007/s00394-022-02951-7>.
- [37] Bergman BC, Perreault L, Strauss A, Bacon S, Kerege A, Harrison K, et al. Intramuscular triglyceride synthesis: importance in muscle lipid partitioning in humans. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism* 2018;314:E152–64. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00142.2017>.
- [38] van Loon LJC, Koopman R, Stegen JHCH, Wagenmakers AJM, Keizer HA, Saris WHM. Intramyocellular lipids form an important substrate source during moderate intensity exercise in endurance-trained males in a fasted state. *J Physiol* 2003;553:611–25. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2003.052431>.
- [39] Romijn JA, Coyle EF, Sidossis LS, Gastaldelli A, Horowitz JF, Endert E, et al. Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration. *Am J Physiol* 1993;265:E380–391. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.1993.265.3.E380>.
- [40] Purdom T, Kravitz L, Dokladny K, Mermier C. Understanding the factors that effect maximal fat oxidation. *Journal of the International Society of Sports Nutrition* 2018;15:3. <https://doi.org/10.1186/s12970-018-0207-1>.
- [41] Hikida RS, Staron RS, Hagerman FC, Sherman WM, Costill DL. Muscle fiber necrosis associated with human marathon runners. *Journal of the Neurological Sciences* 1983;59:185–203. [https://doi.org/10.1016/0022-510X\(83\)90037-0](https://doi.org/10.1016/0022-510X(83)90037-0).
- [42] Franchini E, de Moraes Bertuzzi RC, Takito MY, Kiss MAPDM. Effects of recovery type after a judo match on blood lactate and performance in specific and non-specific judo tasks. *Eur J Appl Physiol* 2009;107:377–83. <https://doi.org/10.1007/s00421-009-1134-2>.
- [43] Calonne J, Arsenijevic D, Scerri I, Miles-Chan JL, Montani J-P, Dulloo AG. Low 24-hour core body temperature as a thrifty metabolic trait driving catch-up fat during weight regain after caloric restriction. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 2019;317:E699–709. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00092.2019>.
- [44] Soare A, Cangemi R, Omodei D, Holloszy JO, Fontana L. Long-term calorie restriction, but not endurance exercise, lowers core body temperature in humans. *Aging (Albany NY)* 2011;3:374–9.
- [45] Heilbronn LK, de Jonge L, Frisard MI, DeLany JP, Larson-Meyer DE, Rood J, et al. Effect of 6-month calorie restriction on biomarkers of longevity, metabolic adaptation, and oxidative stress in overweight individuals: a randomized controlled trial. *JAMA* 2006;295:1539–48. <https://doi.org/10.1001/jama.295.13.1539>.
- [46] Laursen PB, Suriano R, Quod MJ, Lee H, Abbiss CR, Nosaka K, et al. Core temperature and hydration status during an Ironman triathlon. *British Journal of Sports Medicine* 2006;40:320–5.
- [47] Devries MC, Hamadeh MJ, Phillips SM, Tarnopolsky MA. Menstrual cycle phase and sex influence muscle glycogen utilization and glucose turnover during moderate-intensity endurance exercise. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 2006;291:R1120–1128. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00700.2005>.
- [48] Cano A, Ventura L, Martinez G, Cugusi L, Caria M, Deriu F, et al. Analysis of sex-based differences in energy substrate utilization during moderate-intensity aerobic exercise. *Eur J Appl Physiol* 2022;122:29–70. <https://doi.org/10.1007/s00421-021-04802-5>.

- [49] Charkoudian N, Stachenfeld NS. Reproductive hormone influences on thermoregulation in women. *Compr Physiol* 2014;4:793–804. <https://doi.org/10.1002/cphy.c130029>.
- [50] Mountjoy M, Sundgot-Borgen J, Burke L, Carter S, Constantini N, Lebrun C, et al. The IOC consensus statement: beyond the Female Athlete Triad--Relative Energy Deficiency in Sport (RED-S). *Br J Sports Med* 2014;48:491–7. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2014-093502>.
- [51] Dulloo AG, Schutz Y. Adaptive Thermogenesis in Resistance to Obesity Therapies: Issues in Quantifying Thrifty Energy Expenditure Phenotypes in Humans. *Curr Obes Rep* 2015;4:230–40. <https://doi.org/10.1007/s13679-015-0156-9>.
- [52] Müller MJ, Enderle J, Bosy-Westphal A. Changes in Energy Expenditure with Weight Gain and Weight Loss in Humans. *Curr Obes Rep* 2016;5:413–23. <https://doi.org/10.1007/s13679-016-0237-4>.
- [53] Zubac D, Reale R, Karnincic H, Sivric A, Jelaska I. Urine specific gravity as an indicator of dehydration in Olympic combat sport athletes; considerations for research and practice. *Eur J Sport Sci* 2018;18:920–9. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1468483>.

SUPPLEMENTARY TABLES

Table S1. Body composition evolution and daily energy intake of athletes according to their sports and sex.

	TOTAL (N = 48)	p-value Condition	SPORT			p-value		SEX		p-value		
			Combat (N = 23)	Strength (N = 12)	Endurance (N = 13)	Sport	Condition x Sport	Males (N = 28)	Females (N = 20)	Sex	Condition x Sex	
WL duration (d)	37.2 ± 29.8	na	25.0 ± 23.7	47.6 ± 38.4	49.9 ± 24.0 ^{aa}	<0.001	na	34.9 ± 27.7	40.4 ± 32.9	0.63	na	
WG duration (d)	49.4 ± 42.5	na	29.2 ± 37.5	60.6 ± 43.9 ^a	78.4 ± 30.6 ^{aa}	<0.001	na	43.5 ± 32.5	58.7 ± 54.7	0.80	na	
ANTHROPOMETRY AND BODY COMPOSITION												
Height (cm)	171.4 ± 8.4	na	171.4 ± 8.8	170.1 ± 8.6	172.7 ± 7.8	0.42	na	175.9 ± 6.3	165.2 ± 6.7	<0.001	na	
BMI (kg.m ⁻²)	CON	23.2 ± 2.6	23.8 ± 2.3	24.6 ± 2.6	21.0 ± 1.5	<0.001		23.5 ± 2.8	22.8 ± 2.3			
	WL	22.0 ± 2.2***	<0.001	22.6 ± 2.2	23.0 ± 1.8	20.2 ± 1.4	Endurance	0.25	22.4 ± 2.3	21.7 ± 2.0	0.28	0.39
	WG	23.1 ± 2.2###		23.4 ± 1.7	24.4 ± 2.4	21.2 ± 1.5	aaa,bbb		23.5 ± 2.5	22.6 ± 1.5		
Body weight (kg)	CON	68.5 ± 10.9	70.1 ± 10.4	71.7 ± 13.1	62.8 ± 7.5			72.8 ± 8.1	62.5 ± 9.8			
	WL	65.0 ± 9.9***	<0.001	66.8 ± 9.9	66.7 ± 11.3	60.5 ± 7.6	0.08	0.08	69.2 ± 8.5	59.3 ± 8.8	<0.001	0.78
	WG	68.5 ± 9.4###		68.7 ± 8.9	71.0 ± 12.6	65.4 ± 5.9			72.6 ± 9.1	61.7 ± 5.0		
delta WL – CON (% from CON)	-4.4 ± 2.3	na	-4.7 ± 2.0	-4.3 ± 2.0	-3.8 ± 3.0	0.10	na	-3.8 ± 1.4	-5.1 ± 3.0	0.25	na	
delta WG – WL (% from WL)	+4.5 ± 2.9	na	+4.4 ± 2.2	+3.8 ± 3.6	+5.5 ± 3.3 ^b	0.03	na	+4.0 ± 2.0	+5.5 ± 3.7	0.33	na	
delta WG – CON (% from CON)	-0.1 ± 1.7	na	-0.3 ± 1.7	-0.7 ± 1.5	+0.8 ± 1.6	0.12	na	-0.2 ± 2.1	-0.1 ± 3.1	0.80	na	
Fat mass (%)	CON	18.7 ± 6.7	17.2 ± 6.4	16.2 ± 4.8	14.1 ± 5.0			12.2 ± 2.6	21.6 ± 4.1			
	WL	17.1 ± 6.5***	<0.001	15.8 ± 6.4	15.2 ± 5.3	12.7 ± 4.2	0.37	0.06	11.1 ± 2.8	19.9 ± 4.5	<0.001	0.25
	WG	18.0 ± 5.7###		15.5 ± 5.8	16.2 ± 5.2	13.7 ± 4.6			11.7 ± 2.4	21.0 ± 3.4		
Fat mass (kg)	CON	11.2 ± 4.4	12.3 ± 5.3	11.5 ± 2.2	9.0 ± 3.3			15.3 ± 6.3	11.1 ± 4.3			
	WL	9.8 ± 3.9***	<0.001	10.8 ± 4.7***	10.0 ± 2.4*	7.9 ± 2.8	0.12	0.04	13.5 ± 5.1	9.0 ± 3.2	<0.001	0.25
	WG	10.4 ± 3.2###		10.5 ± 3.3*	11.3 ± 2.7	9.2 ± 3.2###			14.5 ± 2.6	10.8 ± 3.7		
delta WL – CON (% from CON)	-12.2 ± 10.6	na	-12.4 ± 9.5	-12.2 ± 13.4	-11.8 ± 10.5	0.95	na	-12.1 ± 10.4	-12.2 ± 11.0	1.00	na	
delta WG – WL (% from WL)	+12.1 ± 17.7	na	+6.1 ± 12.9	+14.3 ± 25.6	+21.8 ± 12.1 ^{aa}	0.01	na	10.8 ± 13.8	+14.1 ± 22.8	0.94	na	
delta WG – CON (% from CON)	-2.6 ± 11.6	na	-7.3 ± 11.3	-1.6 ± 11.4	+5.6 ± 7.5 ^{aa}	0.01	na	-3.2 ± 11.1	-1.7 ± 12.7	0.67	na	
FFM (kg)	CON	52.9 ± 9.0	57.0 ± 9.9	59.3 ± 13.6	52.9 ± 7.4			62.8 ± 8.0	47.6 ± 6.0			
	WL	51.4 ± 8.9***	<0.001	55.2 ± 9.6	55.9 ± 12.5	51.9 ± 7.1	0.30	0.06	60.4 ± 7.2	46.4 ± 6.0	<0.001	0.45
	WG	53.5 ± 8.9###		57.1 ± 10.5	58.9 ± 13.2	55.1 ± 5.2			62.9 ± 8.1	47.6 ± 4.5		
delta WL – CON (% from CON)	-2.6 ± 2.3	na	-3.0 ± 2.2	-2.6 ± 2.3	-1.9 ± 2.7	0.43	na	-2.7 ± 1.7	-2.5 ± 2.9	0.98	na	
delta WG – WL (% from WL)	+3.2 ± 2.6	na	+4.0 ± 2.8	+2.2 ± 2.1	+2.5 ± 2.3	0.08	na	+3.1 ± 2.5	+3.4 ± 2.8	0.73	na	
delta WG – CON (% from CON)	+0.3 ± 2.8	na	+0.8 ± 2.9	-0.6 ± 2.6	+0.3 ± 2.8	0.48	na	+0.2 ± 2.6	+0.4 ± 3.2	0.97	na	

Android/Gynoid fat mass ratio												
	CON	0.81 ± 0.17		0.78 ± 0.14	0.88 ± 0.16	0.81 ± 0.21			0.88 ± 0.17	0.71 ± 0.10		
	WL	0.77 ± 0.17	0.09	0.74 ± 0.17	0.8 ± 0.14	0.8 ± 0.2	0.13	0.40	0.84 ± 0.17	0.67 ± 0.12	<0.001	0.98
	WG	0.81 ± 0.17		0.75 ± 0.12	0.89 ± 0.22	0.86 ± 0.17			0.88 ± 0.17	0.70 ± 0.09		
BMC (kg)												
	CON	2.55 ± 0.48		2.69 ± 0.52	2.49 ± 0.46	2.37 ± 0.36			2.72 ± 0.34	2.31 ± 0.55		
	WL	2.55 ± 0.50	0.32	2.69 ± 0.55	2.47 ± 0.49	2.36 ± 0.36	0.46	0.11	2.72 ± 0.35	2.32 ± 0.59	0.96	0.14
	WG	2.57 ± 0.47		2.68 ± 0.53	2.51 ± 0.47	2.42 ± 0.28			2.71 ± 0.33	2.35 ± 0.58		
BMD (g.cm ⁻²)												
	CON	0.81 ± 0.17		1.28 ± 0.17	1.23 ± 0.08	1.17 ± 0.09			1.26 ± 0.07	1.21 ± 0.20		
	WL	0.77 ± 0.17	0.001	1.28 ± 0.17	1.24 ± 0.08	1.17 ± 0.09	0.06	0.38	1.25 ± 0.07	1.21 ± 0.19	0.24	0.21
	WG	0.81 ± 0.17*#####		1.27 ± 0.17	1.23 ± 0.07	1.17 ± 0.08			1.25 ± 0.07	1.22 ± 0.20		
Hydration (%)												
	CON	58.9 ± 5.2		58.3 ± 5.5	57.5 ± 3.8	61.4 ± 5.3			61.9 ± 3.7	54.8 ± 4.1		
	WL	60.5 ± 5.2***	<0.001	60.0 ± 5.6	59.2 ± 4.2	62.5 ± 4.8	0.16	0.37	63.6 ± 3.3	56.3 ± 4.2	<0.001	0.99
	WG	59.7 ± 4.5###		59.6 ± 4.6	58.2 ± 3.7	61.4 ± 4.9			62.3 ± 3.2	55.3 ± 2.5		
ENERGY AND NUTRITIONAL INTAKE												
EI (kcal/day)												
	CON	2522 ± 725		2432.2 ± 498	2582.6 ± 790.4	2627.2 ± 1001.1			2079.3 ± 398.4	2839.3 ± 744.7		
	WL	1685 ± 817***	<0.001	1255.7 ± 680.8***	1895.8 ± 788	2315.6 ± 612.9 ^{aaa}	0.06	<0.001	1248.8 ± 607.4	1992.4 ± 814.1	<0.001	0.16
	WG	2295 ± 766###		2219.4 ± 722.2###	2562.3 ± 913.9	2180.6 ± 699.5			2077.9 ± 620.8	2432.3 ± 826.9		
Protein (g)												
	CON	115 ± 42		106.3 ± 33.5	150.8 ± 53.4	100.3 ± 29.8			97.7 ± 26.8	128.7 ± 47.9		
	WL	83 ± 45***	<0.001	66.2 ± 38*** ^b	111.9 ± 63.3	91.3 ± 21.5	<0.001	Strength ^{aaa}	61.4 ± 26.9	99.3 ± 49.8	0.001	0.68
	WG	109 ± 55###		99.4 ± 45.6### ^b	153.5 ± 73.5##	87.6 ± 26.3 ^b		Endurance ^{bb}	87.9 ± 33	123.9 ± 62.8		
Lipid (g)												
	CON	89 ± 32		89.3 ± 26.5	89.9 ± 37.6	91.1 ± 38.7			76.7 ± 21.9	99.4 ± 35.5		
	WL	61 ± 51***	<0.001	38.7 ± 23.7***	69.5 ± 46.1	99.1 ± 70.9 ^a	0.02	Endurance ^a	37.9 ± 22.8	78.7 ± 59	<0.001	0.24
	WG	83 ± 35##		75.8 ± 30.4##	95.9 ± 45.8	87.2 ± 30.7			72.8 ± 28.8	90.6 ± 37.4		
CHO (g)												
	CON	288 ± 102		281.4 ± 75.2	262.8 ± 88.9	323.9 ± 145.5			231.8 ± 63.5 ^{cc}	328.5 ± 106.3		
	WL	182 ± 99***	<0.001	149.6 ± 88.3	171.4 ± 71	256.2 ± 109.7	0.07	0.09	152.2 ± 84.7**	204.1 ± 105***	0.01	0.03
	WG	260 ± 78###		262 ± 79.9	252 ± 68.7	268 ± 91.3			248.9 ± 65.7 ^{ooo}	268.6 ± 86.1 ^{ooo}		

Condition effect: Significant difference from CON: *: p<0.05, **: p<0.01, ***: p<0.001. Significant difference from WL: #: p<0.05, ##: p<0.01, ###: p<0.001.

Sport effect: Significant difference with combat sports athletes: ^a: p<0.05, ^{aa}: p<0.01, ^{aaa}: p<0.001. Significant difference with strength sports athletes: ^b: p<0.05, ^{bb}: p<0.01, ^{bbb}: p<0.001.

Data were missing in WL for N = 1 strength sports male, and in WG for N = 2 endurance sports females and N = 1 combat sports female. Deltas were calculated as the percentage of change from the previous weight. For example, the delta WL - CON (%) corresponds to the percentage of weight lost from the weight at CON, the delta WG - WL (%) corresponds to the percentage of weight lost from the weight at WL, and the delta WG - CON (%) corresponds to the percentage of weight lost from the weight at CON. BMC: bone mineral content, BMD: bone mineral density, BMI: body mass index, CHO: carbohydrates, CON: control, EI: energy intake, FFM: fat-free mass, WL: weight loss, WG: weight gain.

Table S2. Resting cardio-metabolic responses to an episode of weight loss and regain in weight-cycling athletes according to their sports and sex.

		TOTAL (N = 48)	p-value Condition	SPORT			p-value		SEX		p-value	
				Combat (N = 23)	Strength (N = 12)	Endurance (N = 13)	Sport	Condition x Sport	Males (N = 28)	Females (N = 20)	Sex	Condition x Sex
VO₂ (l.min⁻¹)												
	CON	0.27 ± 0.06		0.27 ± 0.06	0.25 ± 0.06	0.27 ± 0.05			0.30 ± 0.05	0.22 ± 0.03		
	WL	0.27 ± 0.06	0.23	0.27 ± 0.07	0.25 ± 0.06	0.26 ± 0.05	0.66	0.73	0.30 ± 0.05	0.22 ± 0.04	<0.001	0.33
	WG	0.28 ± 0.06		0.28 ± 0.07	0.27 ± 0.07	0.28 ± 0.03			0.31 ± 0.04	0.22 ± 0.04		
VO₂ (ml.min⁻¹.kgFFM⁻¹)												
	CON	4.81 ± 0.59		4.88 ± 0.47	4.30 ± 0.59	5.14 ± 0.52	0.001		4.87 ± 0.62	4.73 ± 0.55		
	WL	4.89 ± 0.69	0.61	4.97 ± 0.68	4.51 ± 0.67	5.06 ± 0.66	Strength ^{aa}	0.68	5.04 ± 0.65	4.69 ± 0.71	0.05	0.36
	WG	4.89 ± 0.62		4.94 ± 0.69	4.59 ± 0.54	5.11 ± 0.44	Endurance ^{bb}		5.04 ± 0.52	4.65 ± 0.7		
EE (kcal.min⁻¹)												
	CON	1.29 ± 0.27		1.33 ± 0.27	1.20 ± 0.31	1.31 ± 0.22			1.45 ± 0.23	1.09 ± 0.16		
	WL	1.28 ± 0.30	0.05	1.31 ± 0.34	1.21 ± 0.29	1.26 ± 0.22	0.69	0.80	1.45 ± 0.23	1.04 ± 0.20	<0.001	0.32
	WG	1.35 ± 0.29 [#]		1.37 ± 0.33	1.31 ± 0.34	1.37 ± 0.13			1.52 ± 0.20	1.08 ± 0.18		
EE (kcal.min⁻¹.kgFFM⁻¹)												
	CON	0.023 ± 0.003		0.024 ± 0.002	0.021 ± 0.003	0.025 ± 0.003	0.002		0.024 ± 0.003	0.023 ± 0.003		
	WL	0.024 ± 0.003	0.45	0.024 ± 0.003	0.022 ± 0.003	0.024 ± 0.003	Strength ^{aa}	0.73	0.024 ± 0.004	0.023 ± 0.003	0.05	0.35
	WG	0.024 ± 0.003		0.024 ± 0.003	0.024 ± 0.003	0.025 ± 0.002	Endurance ^{bb}		0.025 ± 0.004	0.023 ± 0.003		
RQ												
	CON	0.84 ± 0.04		0.84 ± 0.05	0.83 ± 0.02	0.84 ± 0.06			0.84 ± 0.04	0.84 ± 0.04		
	WL	0.80 ± 0.05 ^{**}	<0.001	0.79 ± 0.04	0.82 ± 0.05	0.81 ± 0.04	0.10	0.06	0.80 ± 0.05	0.81 ± 0.05	0.91	0.90
	WG	0.86 ± 0.05 ^{####}		0.88 ± 0.05	0.85 ± 0.04	0.85 ± 0.05			0.87 ± 0.05	0.86 ± 0.05		
CHO oxidation (mg.min⁻¹)												
	CON	163.5 ± 67.9		169.6 ± 73.7	146.2 ± 46.3	167.8 ± 75			183.0 ± 71.7	138.2 ± 54.3		
	WL	124.9 ± 69.6 ^{**}	<0.001	113.9 ± 78.2	139.4 ± 71.4	131.9 ± 51.1	0.90	0.13	141.8 ± 76.9	102.0 ± 51.6	<0.001	0.36
	WG	204.7 ± 80.1 ^{#####}		221.7 ± 84.5	186.6 ± 86.5	190.2 ± 61.3			233.7 ± 76.4	156.8 ± 62.5		
CHO oxidation (mg.min⁻¹.kgFFM⁻¹)												
	CON	2.9 ± 1.1		3.0 ± 1.1	2.5 ± 0.5	3.2 ± 1.4			3.0 ± 1.1	2.9 ± 1.0		
	WL	2.3 ± 1.1 ^{**}	<0.001	2.0 ± 1.1	2.5 ± 1.1	2.6 ± 1.1	0.32	0.08	2.3 ± 1.1	2.2 ± 1.1	0.31	0.69
	WG	3.6 ± 1.2 ^{#####}		3.9 ± 1.2	3.1 ± 0.8	3.5 ± 1.2			3.8 ± 1.1	3.3 ± 1.2		
lipid oxidation (mg.min⁻¹)												
	CON	72.0 ± 22.9		73.5 ± 23.6	68.9 ± 18.7	72.1 ± 26.4			80.9 ± 22.0	60.4 ± 18.8		
	WL	86.2 ± 29.3 ^{**}	<0.001	95.0 ± 32.2	73.3 ± 27.2	81.6 ± 21	0.65	0.04	97.9 ± 28.4	70.3 ± 22.5	0.004	0.61
	WG	62.4 ± 25.6 ^{###}		57.3 ± 29.2	65.6 ± 15.8	69.1 ± 26.6 [#]			68.8 ± 25.8	51.8 ± 22.1		
lipid oxidation (mg.min⁻¹.kgFFM⁻¹)												

	<i>CON</i>	1.3 ± 0.4		1.3 ± 0.4	1.2 ± 0.2	1.4 ± 0.5			1.32 ± 0.37	1.28 ± 0.41		
	<i>WL</i>	1.6 ± 0.5**	<0.001	1.7 ± 0.5	1.3 ± 0.5 ^a	1.6 ± 0.3	0.27	0.05	1.65 ± 0.46	1.51 ± 0.43	0.36	0.77
	<i>WG</i>	1.1 ± 0.4###		1.0 ± 0.5	1.2 ± 0.4	1.2 ± 0.4##			1.12 ± 0.41	1.10 ± 0.48		
HR (bpm)												
	<i>CON</i>	59.8 ± 9.1		61.1 ± 8.1	62.0 ± 7.9	55.7 ± 11.1			59.6 ± 9.0	60.2 ± 9.6		
	<i>WL</i>	56.1 ± 12.1**	0.01	57.8 ± 11.3	59.2 ± 10.3	50.3 ± 13.5	0.07	0.89	55.5 ± 12.1	56.8 ± 12.3	0.90	0.79
	<i>WG</i>	59.7 ± 10.1 [#]		60.2 ± 9.3	61.8 ± 10.7	56.4 ± 11.0			59.6 ± 9.6	59.9 ± 11.1		

Condition effect: Significant difference from CON: *: p<0.05, **: p<0.01, ***: p<0.001. Significant difference from WL: #: p<0.05, ##: p<0.01, ###: p<0.001.

Sport effect: Significant difference with combat sports athletes: ^a: p<0.05, ^{aa}: p<0.01, ^{aaa}: p<0.001.

Data were missing in WL for N = 1 strength sports male, and in WG for N = 2 endurance sports females and N = 1 combat sports female.

CHO: carbohydrates, CON: control, EE: energy expenditure, FFM: fat-free mass, HR: heart rate, RQ: respiratory quotient, VO₂: volume of oxygen consumed, WL: weight loss, WG: weight gain.

Table S3. Exercising cardio-metabolic responses to an episode of weight loss and regain in weight-cycling athletes according to their sports and sex.

	TOTAL (N = 48)	p-value Condition	SPORT			p-value		SEX		p-value	
			Combat (N = 23)	Strength (N = 12)	Endurance (N = 13)	Sport	Condition x Sport	Males (N = 28)	Females (N = 20)	Sex	Condition x Sex
VO₂ (l.min⁻¹)											
CON	1.2 ± 0.4		1.13 ± 0.35	1.06 ± 0.35	1.32 ± 0.35			1.36 ± 0.32	0.89 ± 0.18		
WL	1.2 ± 0.4	0.12	1.11 ± 0.34	1.04 ± 0.38	1.38 ± 0.36	0.07	0.14	1.36 ± 0.33	0.91 ± 0.25	<0.001	0.30
WG	1.2 ± 0.4		1.10 ± 0.32	1.05 ± 0.35	1.33 ± 0.36			1.32 ± 0.29	0.87 ± 0.24		
VO₂ (ml.min⁻¹.kgFFM⁻¹)											
CON	20.5 ± 5.3		19.5 ± 4.4	17.7 ± 3.4	24.9 ± 5.6	<0.001		21.8 ± 5.3	18.7 ± 4.8		
WL	21.4 ± 6.0**	<0.001	19.9 ± 4.7	18.4 ± 5.0	26.6 ± 6.1	Endurance	0.13	22.7 ± 5.9	19.7 ± 6.0	0.06	0.52
WG	20.0 ± 4.9####		19.3 ± 3.8	17.7 ± 3.9	24.0 ± 5.6	aaa,bbb		21.4 ± 4.9	17.9 ± 4.3		
EE (kcal.min⁻¹)											
CON	5.8 ± 1.9		5.8 ± 2.1	5.2 ± 1.7	6.4 ± 1.7			6.9 ± 1.8	4.3 ± 0.9 ^{ccc}		
WL	5.6 ± 1.8	0.05	5.4 ± 1.6**	5.0 ± 1.9	6.6 ± 1.7	0.10	0.01	6.5 ± 1.6	4.4 ± 1.2 ^{ccc}	<0.001	0.01
WG	5.6 ± 1.7		5.4 ± 1.6	5.1 ± 1.7	6.5 ± 1.8			6.5 ± 1.4***	4.2 ± 1.2 ^{ccc}		
EE (kcal.min⁻¹.kgFFM⁻¹)											
CON	0.10 ± 0.03		0.10 ± 0.03	0.09 ± 0.02	0.12 ± 0.03 ^{bb}	<0.001		0.11 ± 0.03	0.09 ± 0.02		
WL	0.10 ± 0.03	0.02	0.10 ± 0.02	0.09 ± 0.02	0.13 ± 0.03 ^{aaa,bbb}	Endurance	0.01	0.11 ± 0.03	0.09 ± 0.03	0.03	0.04
WG	0.10 ± 0.02#		0.09 ± 0.02	0.09 ± 0.02	0.12 ± 0.03 ^{a,bb}	aaa,bbb		0.10 ± 0.02*	0.09 ± 0.02		
RQ											
CON	0.84 ± 0.03		0.85 ± 0.03	0.85 ± 0.02	0.83 ± 0.03			0.85 ± 0.03	0.84 ± 0.03		
WL	0.81 ± 0.04***	<0.001	0.80 ± 0.03***	0.83 ± 0.06	0.81 ± 0.03	0.13	<0.001	0.81 ± 0.04	0.81 ± 0.04	0.33	0.49
WG	0.86 ± 0.04****###		0.87 ± 0.03****	0.86 ± 0.04####	0.84 ± 0.03####			0.86 ± 0.04	0.85 ± 0.03		
CHO oxidation (mg.min⁻¹)											
CON	763.2 ± 325.0		780.8 ± 355.8	722.2 ± 313.4	769.8 ± 299			912.9 ± 320.8	553.5 ± 189.3		
WL	593.2 ± 327.3***	<0.001	528.2 ± 240.9***	648.2 ± 536.9	661.6 ± 219.5	0.89	<0.001	692.8 ± 351.9	458.7 ± 238.3	<0.001	0.06
WG	827.5 ± 329.4****###		844.3 ± 349.5####	775.9 ± 351.6	851.9 ± 286.2###			966.1 ± 293.2	607.4 ± 260.7		
CHO oxidation (mg.min⁻¹.kgFFM⁻¹)											
CON	13.3 ± 4.8		13.4 ± 4.9	11.9 ± 3.4	14.6 ± 5.7			14.5 ± 4.7	11.7 ± 4.6		
WL	10.8 ± 5.4***	<0.001	9.3 ± 3.6***	11.1 ± 7.8	13.1 ± 5.2	0.19	<0.001	11.4 ± 5.1	10.0 ± 5.8	0.08	0.22
WG	14.3 ± 4.7****###		14.7 ± 5.2####	12.8 ± 3.7	15.4 ± 4.9##			15.5 ± 4.2	12.6 ± 5.1		
lipid oxidation (mg.min⁻¹)											
CON	295.6 ± 92.3	<0.001	272.0 ± 76.1	260.3 ± 63.4	370.0 ± 103.8 ^{a,b}	<0.001	<0.001	337.0 ± 92.1	237.6 ± 54.4 ^{ccc}	<0.001	0.03

WL	361.7 ± 119.2***		357.9 ± 90.9***	276.8 ± 101.4	440.2 ± 132.1 ^{aaa***}	Endurance _{aa,bbb}		419.0 ± 111.5***	284.3 ± 80.2 _{ccc***}		
WG	263.6 ± 109.9 ^{***###}		236.4 ± 87.3 ^{###}	234.2 ± 97.8	347.5 ± 125.7 ^{###}			300.2 ± 114.8 ^{***###}	205.3 ± 71.7 _{ccc###}		
lipid oxidation (mg.min⁻¹.kgFFM⁻¹)											
CON	2.3 ± 1.5		4.7 ± 1.0	4.4 ± 0.7	7.0 ± 1.6 ^{aaa,bbb}	<0.001		5.5 ± 1.7	5.0 ± 1.3		
WL	6.7 ± 2.0***	<0.001	6.4 ± 1.3***	5.0 ± 1.7 ^a	8.4 ± 2.0 ^{aaa,bbb***}	Endurance	<0.001	7.1 ± 2.2	6.1 ± 1.7	0.15	0.21
WG	4.6 ± 1.8***###		4.1 ± 1.2***###	4.0 ± 1.6 ^{##}	6.3 ± 2.0 ^{aaa,bbb***}	_{aaa,bbb}		4.9 ± 2.0	4.2 ± 1.4		
reserve HR (bpm)											
CON	135.6 ± 9.4		136.0 ± 7.7	132.0 ± 8.1	138.3 ± 12.4			134.7 ± 9.9	136.8 ± 8.8		
WL	139.5 ± 12.7**	0.01	139.3 ± 12.3	135.1 ± 9.2	143.7 ± 15.2	0.13	0.91	139.0 ± 13.9	140.2 ± 11.0	0.39	0.74
WG	136.0 ± 10.8 [#]		136.8 ± 9.9	132.1 ± 9.8	138.6 ± 13.1			134.7 ± 11.4	138.1 ± 9.7		
%reserve HR											
CON	30.7 ± 5.4		30.8 ± 5.6	29.1 ± 4.5	31.9 ± 5.9			31.0 ± 5.8	30.2 ± 4.9		
WL	32.1 ± 5.1	0.20	32.5 ± 3.6	29.3 ± 4.6	33.7 ± 6.8	0.14	0.94	32.2 ± 5.0	31.9 ± 5.3	0.88	0.68
WG	30.3 ± 5.4		30.9 ± 5.2	28.2 ± 5.3	31.2 ± 5.6			30.3 ± 5.6	30.2 ± 5.1		

Condition effect:

Significant difference from CON: *: p<0.05, **: p<0.01, ***: p<0.001

Significant difference from WL: #: p<0.05, ##: p<0.01, ###: p<0.001

Sport effect:

Significant difference with endurance sports athletes: ^a: p<0.05, ^{aa}: p<0.01, ^{aaa}: p<0.001

Significant difference with strength sports athletes: ^b: p<0.05, ^{bb}: p<0.01, ^{bbb}: p<0.001

Sex effect:

Significant difference with males: ^c: p<0.05, ^{cc}: p<0.01, ^{ccc}: p<0.001

Data were missing in WL for N = 1 strength sports male, and in WG for N = 2 endurance sports females and N = 1 combat sports female.

CHO: carbohydrates, CON: control, EE: energy expenditure, FFM: fat-free mass, HR: heart rate, RQ: respiratory quotient, VO₂: volume of oxygen consumed, WL: weight loss, WG: weight gain.

Table S4. Core body temperature evolution of athletes according to their sports and sex.

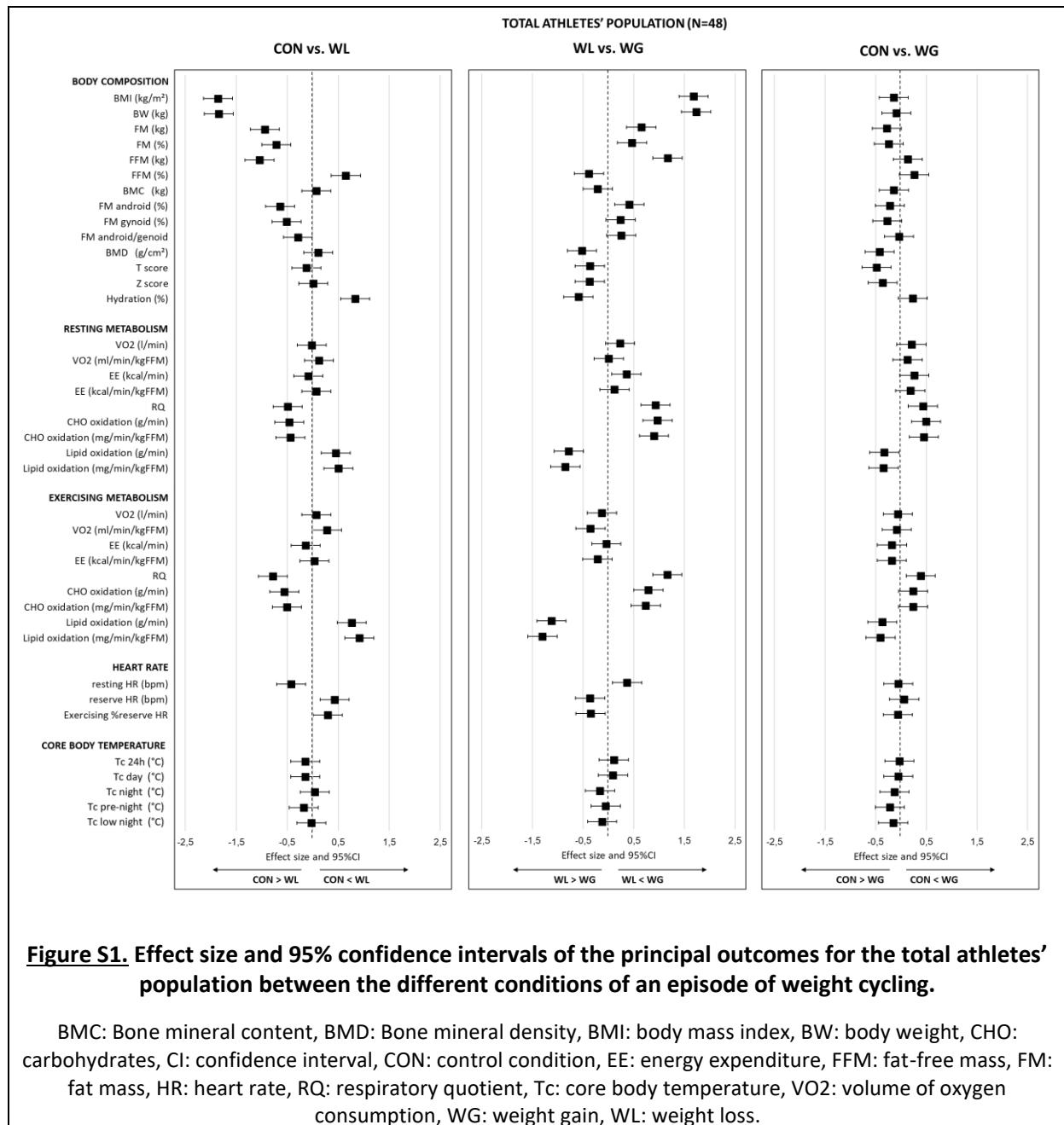
	TOTAL (N = 48)	p-value Condition	SPORT			Sport	p-value Condition x Sport	SEX		Sex	p-value Condition x Sex
			Combat (N = 23)	Strength (N = 12)	Endurance (N = 13)			Males (N = 28)	Females (N = 20)		
T_c 24h (°C)											
CON	36.98 ± 0.26		36.98 ± 0.26	37.00 ± 0.28	36.97 ± 0.26			36.91 ± 0.26	37.09 ± 0.23		
WL	36.95 ± 0.24	0.58	36.96 ± 0.23	36.99 ± 0.29	36.88 ± 0.22	0.78	0.88	36.79 ± 0.10	37.17 ± 0.21 ^{ccc}	<0.001	0.01
WG	36.98 ± 0.27		36.96 ± 0.27	37.05 ± 0.33	36.94 ± 0.21			36.91 ± 0.26	37.08 ± 0.26		
T_c day (°C)											
CON	37.17 ± 0.23		37.17 ± 0.24	37.16 ± 0.23	37.19 ± 0.25			37.10 ± 0.21	37.29 ± 0.23 ^c		
WL	37.14 ± 0.24	0.59	37.14 ± 0.23	37.19 ± 0.29	37.09 ± 0.22	0.94	0.58	37.00 ± 0.15	37.33 ± 0.20 ^{ccc}	<0.001	0.02
WG	37.16 ± 0.23		37.13 ± 0.24	37.2 ± 0.25	37.17 ± 0.2			37.11 ± 0.21	37.24 ± 0.24		
T_c night (°C)											
CON	36.67 ± 0.34		36.67 ± 0.35	36.74 ± 0.36	36.62 ± 0.33			36.59 ± 0.35	36.79 ± 0.30		
WL	36.68 ± 0.29	0.50	36.71 ± 0.28	36.67 ± 0.33	36.63 ± 0.27	0.90	0.76	36.50 ± 0.14	36.92 ± 0.26 ^{ccc}	<0.001	0.05
WG	36.63 ± 0.28		36.61 ± 0.33	36.68 ± 0.28	36.61 ± 0.23			36.50 ± 0.19	36.83 ± 0.30 ^{cc}		
T_c pre-night (°C)											
CON	36.94 ± 0.38		37.04 ± 0.42	36.77 ± 0.27	36.9 ± 0.36			36.92 ± 0.39	36.96 ± 0.37		
WL	36.93 ± 0.40	0.20	36.99 ± 0.39	36.86 ± 0.48	36.86 ± 0.34	0.50	0.30	36.76 ± 0.32	37.15 ± 0.39 ^{ccc}	0.02	0.01
WG	36.83 ± 0.35		36.80 ± 0.39	36.91 ± 0.19	36.82 ± 0.39			36.72 ± 0.32	37.00 ± 0.33 ^c		
T_c low night (°C)											
CON	36.42 ± 0.35		36.41 ± 0.32	36.44 ± 0.36	36.42 ± 0.41			36.32 ± 0.34	36.57 ± 0.30		
WL	36.41 ± 0.32	0.55	36.41 ± 0.32	36.49 ± 0.30	36.33 ± 0.35	0.75	0.82	36.21 ± 0.16	36.68 ± 0.29	<0.001	0.09
WG	36.36 ± 0.32		36.38 ± 0.33	36.43 ± 0.25	36.27 ± 0.34			36.20 ± 0.19	36.60 ± 0.32		

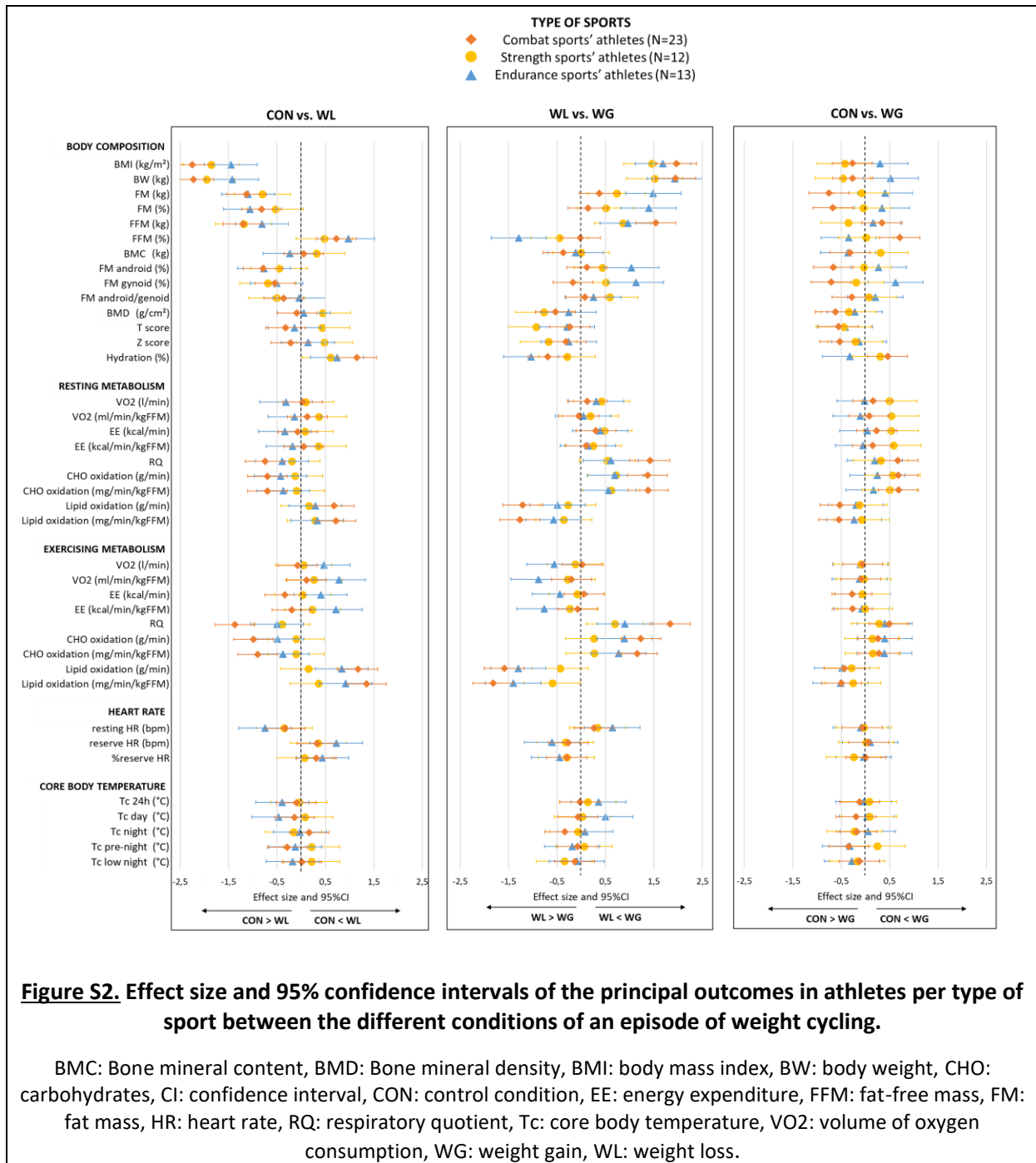
Sport effect: Significant difference with males: ^c: p<0.05, ^{cc}: p<0.01, ^{ccc}: p<0.001

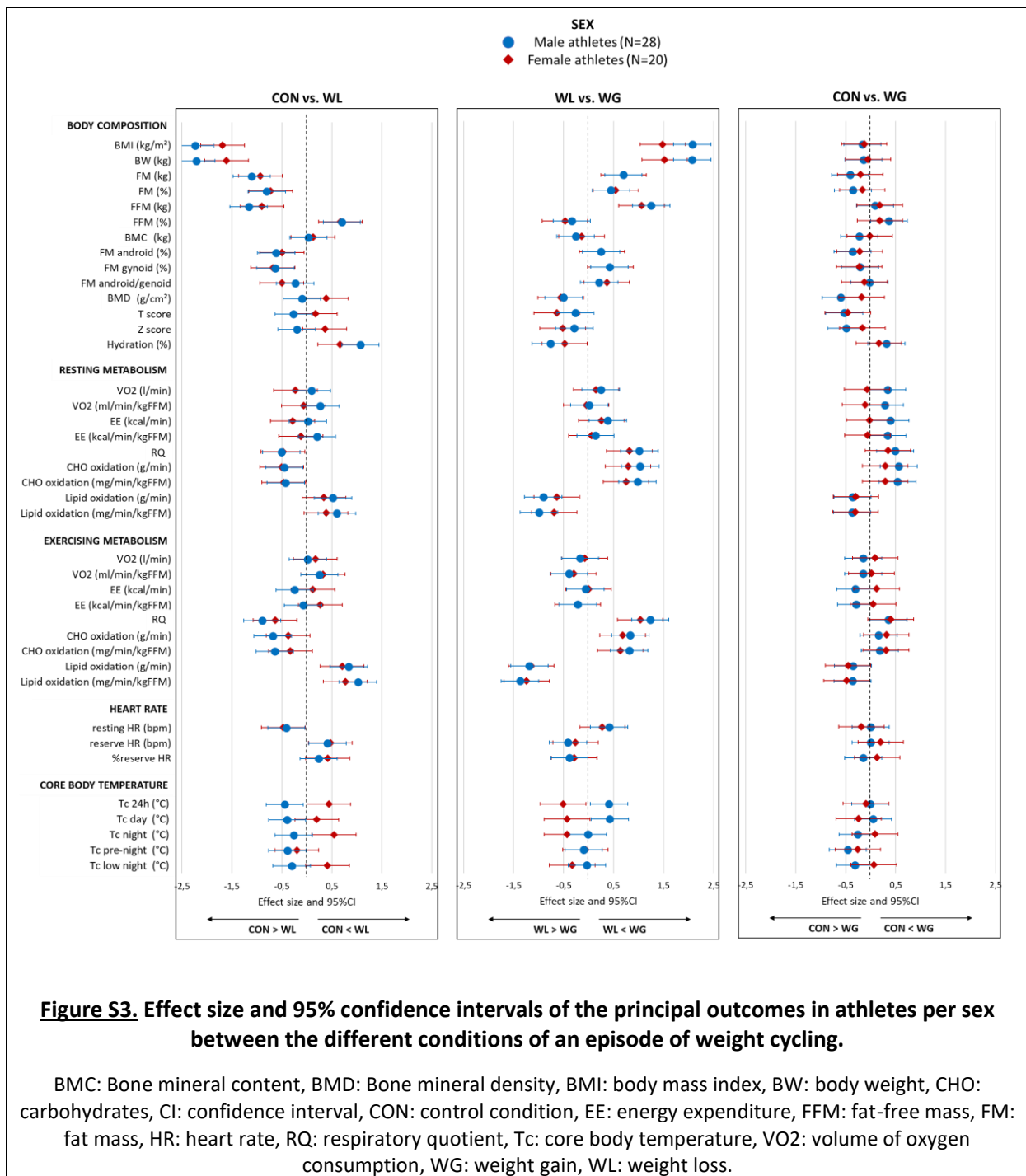
Data were missing in WL for N = 1 strength sports male, and in WG for N = 2 endurance sports females and N = 1 combat sports female.

CON: control, T_c: core body temperature, WL: weight loss, WG: weight gain.

SUPPLEMENTARY FIGURES







ÉTUDE 3

Adaptations nutritionnelles à un épisode de perte et
reprise de poids chez des athlètes habitués au « *weight
cycling* ».
Résultats de l'étude WAVE

**APPETITE CONTROL AND EATING BEHAVIOR TRAITS MIGHT NOT BE IMPACTED BY A
SINGLE WEIGHT CYCLING EPISODE IN WEIGHT-CYCLING ATHLETES: RESULTS OF THE WAVE
STUDY.**

Running title: Nutritional adaptation in weight cyclers

Sarah BAGOT^{1*}, Inès RAMOS², Anthony C. HACKNEY^{3,4}, Graham FINLAYSON⁵, Elora FOURNIER¹, Yves
BOIRIE⁶, Martine DUCLOS^{7,8}, Laurie ISACCO^{1,8}, David THIVEL^{1,8}

1. Clermont Auvergne University, UPR 3533, Laboratory of the Metabolic Adaptations to Exercise under Physiological and Pathological Conditions (AME2P), CRNH Auvergne, Clermont-Ferrand, France. sarah.bagot@uca.fr; elora.fournier@uca.fr; laurie.isacco@uca.fr; david.thivel@uca.fr.

2. Clermont-Ferrand University Hospital, Biostatistics Unit (DRCI), Clermont-Ferrand, France. iramos@chu-clermontferrand.fr.

3. Department of Exercise & Sport Science, University of North Carolina, Chapel Hill, NC 27599, USA. ach@email.unc.edu.

4. Department of Nutrition, Gillings School of Global Public Health, University of North Carolina, Chapel Hill, NC 27599, USA.

5. School of Psychology, Appetite Control and Energy Balance Research Group, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK. g.s.finlayson@leeds.ac.uk.

6. Department of Human Nutrition, Clermont-Ferrand University Hospital, G. Montpied Hospital, Clermont-Ferrand 63000, France. yves.boirie@uca.fr.

7. Department of Sport Medicine and Functional Explorations, CHU Clermont-Ferrand, Clermont-Ferrand, France. mduclos@chu-clermontferrand.fr.

8. International Research Chair Health in Motion, Clermont Auvergne University Foundation, Clermont-Ferrand, France.

***Corresponding author:** Sarah BAGOT, Clermont Auvergne University, UPR 3533, Laboratory of the Metabolic Adaptations to Exercise under Physiological and Pathological Conditions (AME2P), CRNH Auvergne, Clermont-Ferrand, France. sarah.bagot@uca.fr.

ABSTRACT

The impact of weight cycling (WC)—successive weight loss (WL) and weight regain (WG)—on athlete performance is well-documented, but effects on appetite are not. This study assessed the impact of a WC episode on dietary and appetitive profiles in athletes, considering sex and sport type. Athletes (28 males, 20 females) from combat (N=23), strength (N=12), and endurance (N=13) sports participated in three conditions during a WC episode (control, WL, WG). Measurements included body composition (Dual-energy X-ray Absorptiometry), energy intake (48h-food record), appetite (visual analog scale), dietary profile (questionnaires), and food reward (computer task). Overall, athletes lost $4.4 \pm 2.3\%$ of their body weight and regained $4.5 \pm 2.9\%$ ($p < 0.001$). Energy intake decreased during WL ($p < 0.001$) with a higher protein intake (% of energy intake) before returning to baseline in WG ($p > 0.05$). WL increased hunger, prospective food consumption, and desire to eat compared to the control condition, but these changes were not seen in WG. Liking and wanting for fat and sweet foods were higher during WL and remained elevated in WG ($p < 0.05$). No eating disorders were found during the WC episode, but combat sport athletes and females had a higher binge eating risk than others, independent of the condition. Acute WC episodes do not seem to impair appetite responses in athletes experienced with WC, likely due to their maintaining high physical activity levels. However, their long-term eating behavior traits, especially in combat and female athletes, seem negatively affected. Practitioners should consider the long-term impacts of these WC practices on nutritional health.

Keywords: Weight variations, Nutrition, Sport, Diet, Physical activity

1. INTRODUCTION

Whether for aesthetic, categorical (*i.e.*, weight classes), and/or performance reasons [1,2], many athletes voluntarily engage in regular weight loss (WL) to reach or maintain a targeted body weight (BW) or body shape. This leads to regular WL episodes that are frequently followed by weight regain (WG). Collectively these BW changes constitute “weight cycling episodes” (WCE), which are primarily observed among weight-category sports such as combat or weightlifting sports. Most of the literature addressing WCE has focused on the description of performance and health implications of the methods used to reach the targeted BW (dehydration by fluid restriction or over-sweating methods, energy restrictions, increased exercise-induced energy expenditure among others), and/or on the development of efficient and safe approaches for athletes to engage in [3]. However, less is known regarding the energetic and nutritional consequences and implications of such practices. Interestingly, recent systematic reviews and meta-analyses highlighted that weight cycling athletes might experience up to 15 WCE per year, exposing them to potential risks of developing body weight dysregulation and cardiometabolic alterations but also eating disorders and appetite control impairments [4,5]. To that end, several studies have for instance detected post-WL binge eating symptomatology among athletes engaged in weight category sports [6,7], 50% of these athletes being identified with regular binge eating episodes [8,9]. According to Fogelholm et al. these athletes who engage in such rapid WL through dieting for performance purposes are doing so during their competitive season only [10]. However, up to 38% of them have been shown to have regular to permanent binge eating behaviors during the off-season [11], being then more likely to develop short to long-term eating disorders than is usually observed in artistic sports (*e.g.*, gymnastics) or the general non-athlete population [12,13].

In a recent cross-sectional study, weight cycling athletes experienced with losing higher degrees of their BW were found to consume more protein but less fat in their diet, which, according to the authors, might indicate a potential conscious control of their eating regulation to spare fat-free mass and favor fat mass loss [14]. Although the authors did not observe any impaired dietary profile while using psychometric questionnaires, their participants were found to approach the threshold for restrained and emotional eating presence (using the DEBQ questionnaire) [14]. This would agree with and support the conclusions from Zwaan et al., who described a higher overall reward sensitivity that might render weight cyclers more vulnerable to weight regain [15].

While the actual research on this topic remains limited and based on self-reported eating habits and psychometric results, we did not find any information regarding the potential impact of such regular WCE on athletes’ appetite control. Indeed, by presenting a high to very high level of physical training,

such athletes experience a high energy flux, being then in the zone of thin regulation of their energy intake and appetite [16]. Interestingly, however, they also experience regular WCE, which has been shown to impair this control of appetite in non-athlete populations [17].

Although the literature focusing on the nutritional consequences remains scarce and mainly composed of cross-sectional and retrospective data, the evolution of the nutritional habits, dietary profile, and appetite control during an entire WCE remains unexplored in weight cycling athletes. In light of the limited available data, the aim of the present study is then to assess the evolution of weight cycling athletes' energy intake, appetite, and dietary profile, as well as food reward during a complete WCE (pre-WL, at the targeted WL point, and after body weight recovery). We hypothesized that athletes who experience rapid WL and WG through restrictive methods (such as dehydration or prolonged fasting) may have a higher risk of developing eating disorders, including binge eating and hyperphagia during WG.

2. METHODS

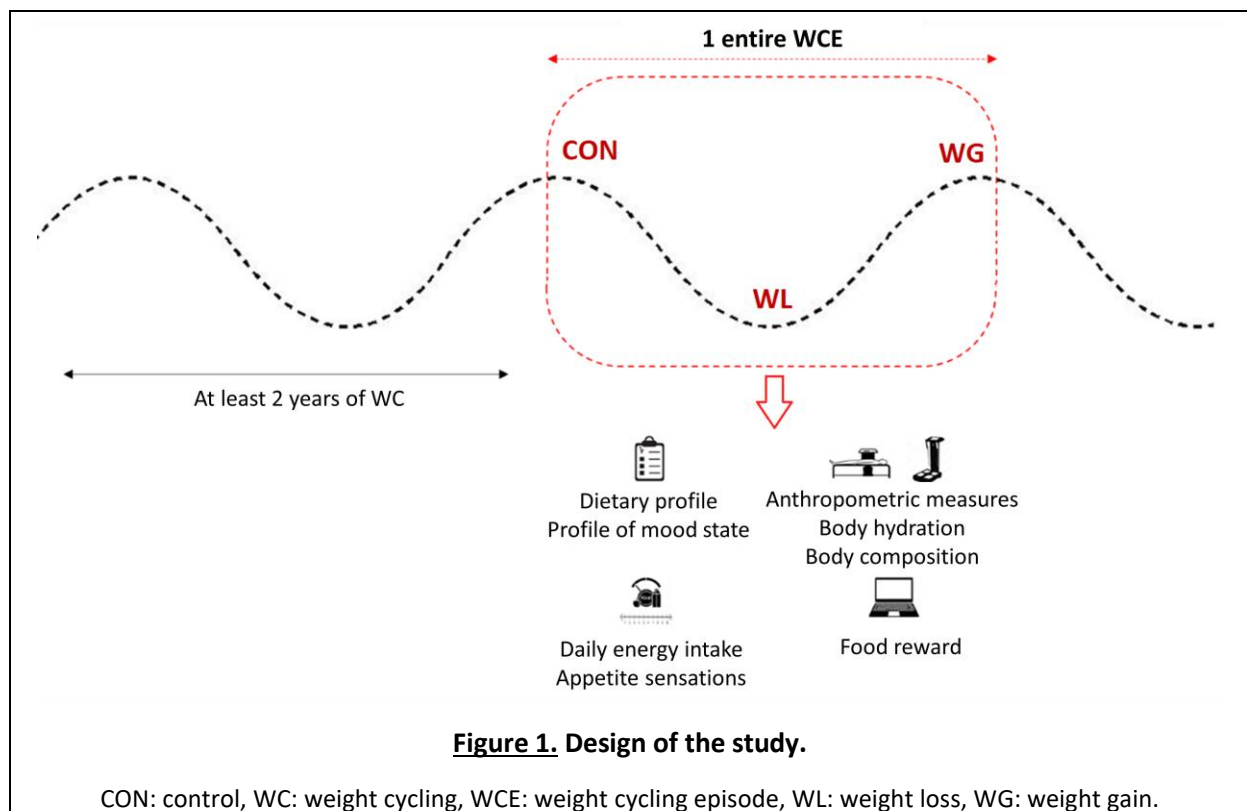
2.1. Participants

Forty-eight healthy male and female athletes (24.6 ± 5.7 years; 11.5 ± 4.6 hours of sports per week; practicing combat ($n = 23$; 11 females), strength ($n = 12$; 5 females), or endurance sports ($n = 13$; 4 females) and used to weight cycling were included. Weight cycling was defined as regular and successive weight loss (WL) and regain (WG) of BW, twice per year minimum for at least a 2-year period. Due to the difference in the type of sport considered and, thus, the specific performance objectives, an usual WL of at least 1.5% and 3% for endurance and weight category sport athletes were expected, respectively [18,19]. It can be voluntary WL to enter a specific weight category for combat and strength sports, or for enhanced performance in endurance sports. The study protocol was approved by the relevant national ethical authorities (North West IV Committee for the Protection of Persons, France, RHPB 2019 DUCLOS 2019-A00699-48) and conducted in accordance with the Declaration of Helsinki, and written informed consent was obtained from all participants before their inclusion.

2.2. Study design

After the first visit to screen for inclusion, three visits were planned: i) at stable body weight prior to a WCE (CON), ii) after a weight loss of at least 1.5 or 3% of total BW, and representative of their habitual

weight loss (WL), iii) after the weight regain phase of the WCE (WG). For each visit, participants arrived at the laboratory after a 12-hour overnight fast. Anthropometric measurements were performed, during which height, BW and total body water were measured by bioimpedance. Then, their food reward was assessed using a computerized behavioral task, and their dietary and eating behavior traits as well as their mood profile assessed using questionnaires (see later sections). Then their body composition by Dual-energy X-ray Absorptiometry (DXA) was assessed. The participants were also asked to fill out a 2-day dietary record. Their weight cycling-related behaviors were evaluated by questionnaire at baseline only. **Figure 1** illustrates the protocol of the study.



2.3. Anthropometry and body composition

Body mass index (BMI) was calculated from height and BW (body weight (kg)/height (m)²). Height was measured with a wall chart. BW and total body water were measured by bioimpedance balance (Tanita MC-780 MA P) in fasting conditions. BW and body composition (fat mass, fat-free mass, bone content) were measured by DXA (Hologic, QDR 4500X-Ray bone densimeter, Hologic, Waltham, MA, USA).

2.4. Self-reported rapid weight loss questionnaire (RWLQ)

Participants responded to the self-reported rapid weight loss questionnaire (RWLQ) developed by Artioli *et al.* (2010) [19] and validated in French by Pelissier *et al.* (2022) [20]. Questions include items related to personal information, competitive level, and weight when participants completed the questionnaire, inter-season weight (weight outside of the training and competition season), diet history, rapid weight loss (RWL) behaviors, the influence of other persons in these practices, and frequency of methods used to lose weight. An individual score is assigned to all questions that assess RWL behaviors. The questionnaire thus generates a total score that reflects the level of harm and aggressiveness of pre-competitive weight management. The higher the score reached by an athlete, the more aggressive and harmful their weight management strategies tend to be.

2.5. Eating behavior traits

The Dutch Eating Behavior Questionnaire (DEBQ) is a 33-item instrument comprised of three subscales that measure emotional, external, and restrained eating, validated in French by Lluch *et al.* [21]. The emotional eating subscale (13 items) measures the tendency to use food to cope with psychological problems and/or to alleviate distress. The external eating subscale (10 items) assesses the frequency of eating in response to external stimuli (*e.g.*, the appearance and smell of food). The restrained eating subscale (10 items) assesses the frequency of restrictive conscious behaviors during eating. A score to each question is attributed by rating on a scale ranging from 0 (I don't feel concerned), 1 (never), 2 (seldom), 3 (sometimes), 4 (often) to 5 (very often), with a higher score indicating more severe eating disorders.

The French version of the 21-item Three-Factor Eating Questionnaire (TFEQ-r21) was used to assess eating behavior considering the factors of cognitive restraint, emotional eating, and uncontrolled eating [22]. This questionnaire covers the following 3 aspects of eating behavior: overall cognitive restraint (6 items), emotional eating (6 items), and uncontrolled eating (9 items). The items are assessed on 4-point scales (1—definitely true; 2—mostly true; 3—mostly false; or 4—definitely false). Higher scores indicate greater cognitive restraint, emotional eating, and/or uncontrolled eating.

Binge eating and its severity were assessed using the French version of the Binge Eating Scale (BES) [23], a 16-items self-administered scale that explores characteristics of behavioral, emotional, and cognitive manifestations of binge eating. An individual dimensional score is obtained by summing the score of each item, offering a possible range from 0 to 46 (the higher the score the more severe the binge eating disorder), with a score greater than or equal to 18 indicating a binge eating disorder.

2.6. Food preferences and reward

Food preferences and rewards were assessed using a computerized behavioral task, the French version of the Leeds Foods Preference Questionnaire (LFPQ) developed by Finlayson *et al.* [24] and validated by Thivel *et al.* [25]. Participants were presented with an array of 16 pictures of individual food items common in the French diet. Foods in the array were selected to be either predominantly high (>50% energy) or low (<20% energy) in fat but similar in familiarity, protein content, sweet or non-sweet taste, and palatability. To measure explicit liking, the subjects rated the extent to which they liked each food (“How pleasant would it be to taste this food now?”). The food images were presented individually, in a randomised order and subjects made their ratings using a 100-mm VAS. Implicit wanting was assessed using a forced choice methodology in which the food images were paired so that every image from each of the 4 food categories (high/low fat crossed with sweet/savoury) was compared to every other category over 96 times (food pairs). Participants respond as quickly and accurately as they can to indicate the food they want to eat the most at that time (“Which food do you most want to eat now?”). Reaction times for all responses were covertly recorded and used to compute mean response times for each food type relative to the overall mean response time after adjusting for frequency of selection. An implicit wanting score ranges between –100 and 100 and is interpreted in relation to the scores of the other food categories evaluated in the task. A positive score indicates that the considered food category was chosen more often and faster than the others. A negative score indicates the opposite.

2.7. Daily energy intake and appetite feelings

After each visit, participants were asked to complete a 48h-food record in free-living conditions providing as much details as possible related to the nature and quantity of all food and drink consumed. If it was not possible to weigh food, participants were provided with validated reference images from the SUVIMAX study [26] to estimate portion size and weight. Total energy intake and absolute and relative macronutrient intake were calculated using the nutrition software for professionals, Nutrilog (Version 3.20, Nutrilog Europe Society, Marans, France). Four appetite questions (hunger, fullness, desire to eat, and prospective consumption) were asked using VAS (from 0 to 100 mm) before and after breakfast, lunch, and dinner. For each appetite sensation, satiety quotients (SQ) were calculated as follows [27]:

$$SQ (mm/kcal) = \frac{VAS \text{ premeal (mm)} - VAS \text{ postmeal (mm)}}{\text{Energy content of meal (kcal)}} \times 100.$$

2.8. Mood profile

The Profile of Mood States (POMS; 65-item questionnaire) was used to evaluate mood states [28]. A total of 6 dimensions of mood on a 5-point Likert scale were considered: tension-anxiety, depression, anger-hostility, vigor activity, fatigue, and confusion-bewilderment. The total mood state score was derived by subtracting the vigor-activity score from the sum of the other scores. Higher scores are indicative of more negative states (except on the vigor-activity scale, where a higher score indicates stronger feelings of vigor).

2.9. Statistical analysis

Continuous data were expressed as mean \pm standard deviation and categorical data numerically as well as associated percentages. Longitudinal analyses were performed using linear mixed models (ANOVA) to assess the effect of condition, sex, or type of sport, and their interaction on energy and nutrient intake, dietary profile, and food reward. The evolution of appetite sensations and satiety quotient were also analysed with a linear mixed model adjusted on condition, time, and their interaction. Margin plots were used to represent the kinetic of these evolutions. The analyses were performed using Stata software (version 15; StataCorp, College Station, TX, USA) and all tests were two-sided with the type-I error set at 5%.

3. RESULTS

3.1. Body weight management

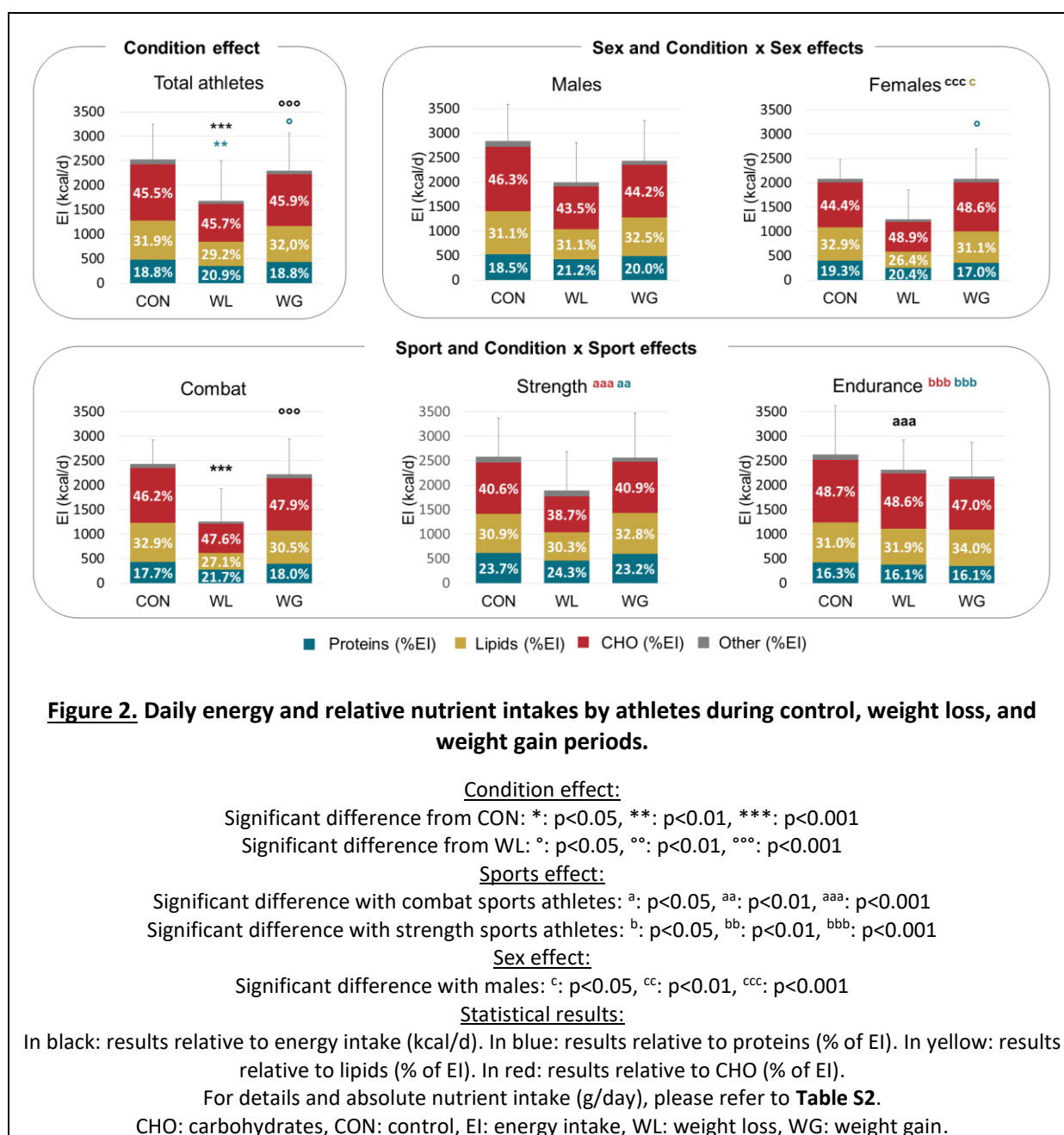
The 48 participants' body weight variations are detailed in **Table S1**. Athletes lost 3.0 ± 1.6 kg ($4.4 \pm 2.3\%$) from their initial BW within 37.2 ± 29.8 days ($p_{\text{sport}} < 0.001$) and regained 2.9 ± 1.6 kg ($4.5 \pm 2.9\%$) after 49.4 ± 42.5 days ($p_{\text{sport}} < 0.001$), reflected by significant fat mass ($-12.2 \pm 10.6\%$ in WL and $+12.2 \pm 17.7\%$ in WG, $p < 0.001$) and fat-free mass variations ($-2.6 \pm 2.3\%$ in WL and $+3.2 \pm 2.6\%$ in WG, $p < 0.001$).

3.2. Mood profile

Mood profiles are detailed in **Table S1**. A significant transitory increased fatigue and decreased vigour were observed in WL ($p = 0.01$ and $p = 0.03$, respectively). A significant sport \times condition effect was observed with a higher anger response in WG than in CON in strength athletes ($p = 0.02$).

3.3. Energy intake

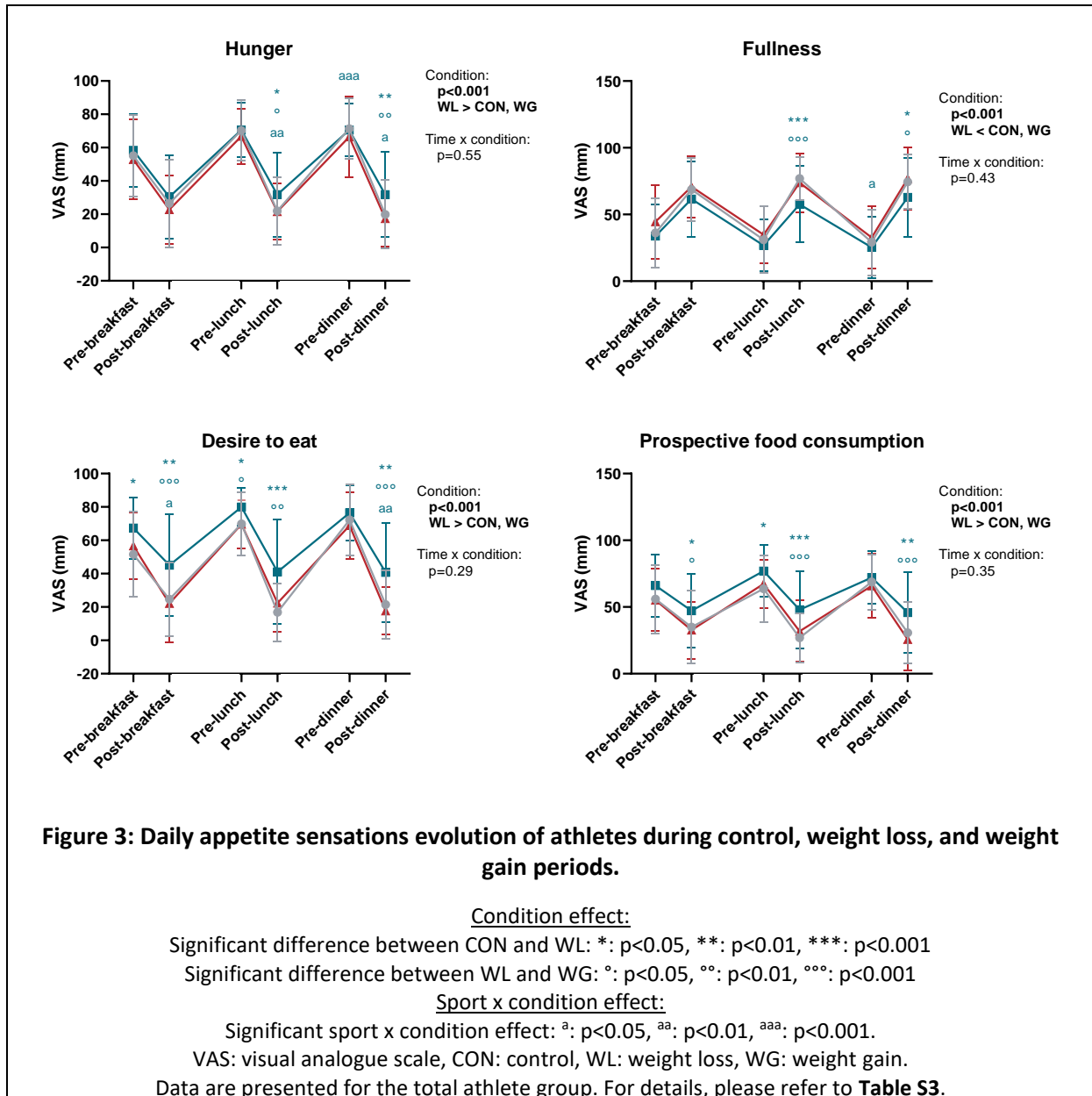
The athletes' energy intake is detailed in **Table S2** and illustrated in **Figure 2**. Absolute daily energy ($p < 0.001$, $p_{\text{sex}} < 0.001$), protein ($p < 0.001$, $p_{\text{sport}} < 0.001$, $p_{\text{sex}} = 0.001$), lipid ($p < 0.001$, $p_{\text{sport}} = 0.02$, $p_{\text{sex}} < 0.001$), and carbohydrate ($p < 0.001$, $p_{\text{sex}} = 0.01$) intake were significantly lower in WL than in CON or WG. However, regarding relative intake (% of energy intake), protein intake only was significantly higher during the WL phase compared to the CON and WG ($p < 0.05$, $p_{\text{sport}} < 0.001$) conditions, while lipid and carbohydrate intake was not different ($p = 0.09$ and $p = 0.95$, respectively). The sport x condition interaction revealed that this finding was particularly apparent in combat sport athletes for absolute energy, protein, and lipid intake ($p < 0.001$). The sex x condition interaction highlighted that males consumed less absolute but not relative carbohydrate in WG than in baseline condition ($p < 0.01$), while females consumed an equivalent amount ($p > 0.05$) but significantly decreased their relative protein intake between WL and WG ($p < 0.05$).



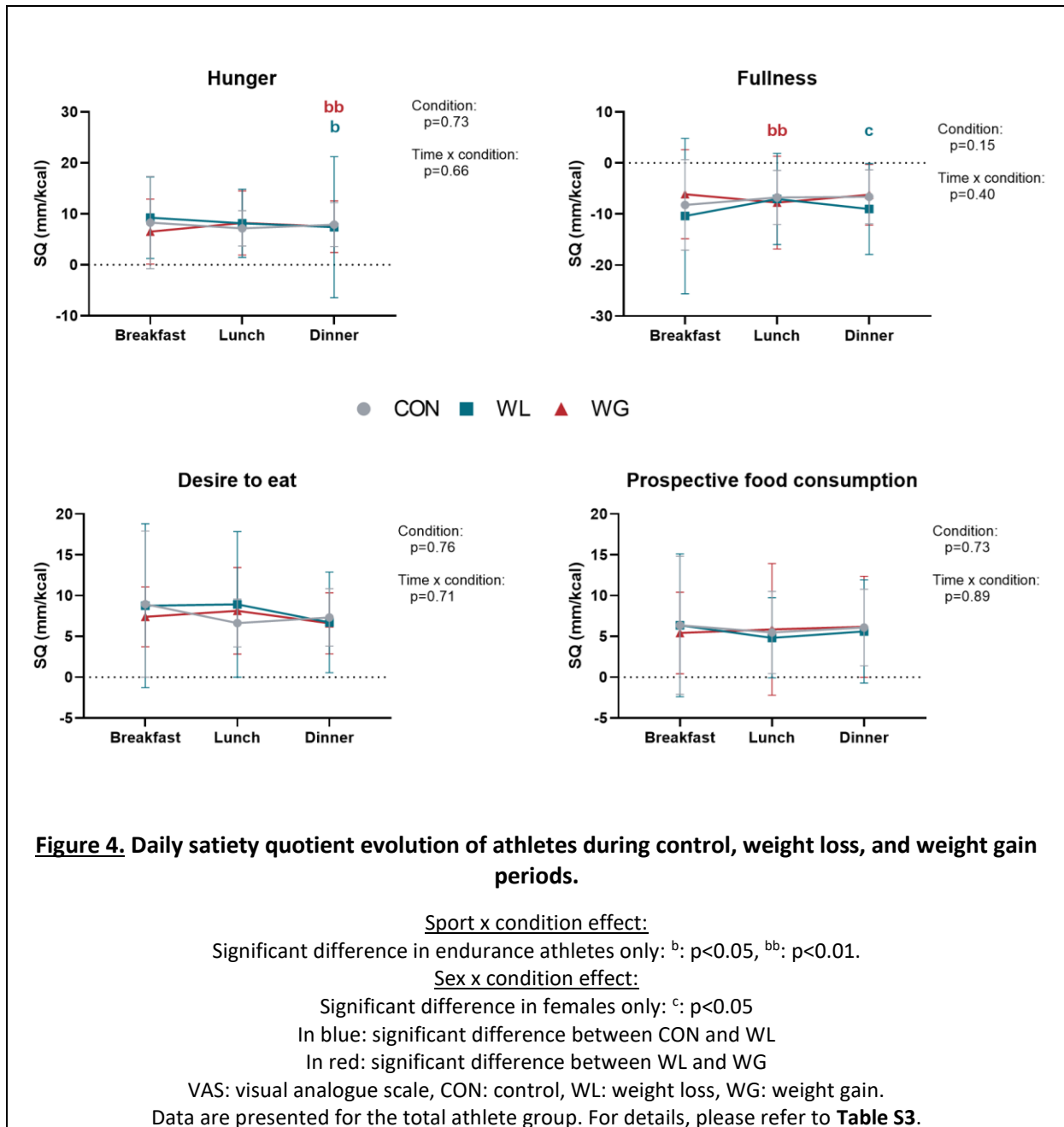
3.4. Appetite sensations

The athletes' daily appetite sensations and SQ are detailed in **Table S3** and their changes throughout the day are illustrated in **Figures 3 and 4**, respectively. Hunger sensation was significantly higher and fullness significantly lower after lunch (p<0.05) and dinner (p<0.01) in WL than in CON and WG. Also, the desire to eat and the prospective for food consumption were higher in WL than in CON and WG before and after each meal, except before dinner for both (p=0.35), and before breakfast for the

prospective for food consumption ($p=0.07$). Sport x condition was observed for hunger (post-lunch: $p=0.01$, pre-dinner: $p<0.001$, and post-dinner: $p=0.03$), fullness (pre-dinner: $p=0.03$), desire to eat (post-breakfast: $p=0.02$, post-dinner: $p=0.01$), but not for prospective for food consumption ($p>0.05$). No sex x condition interaction was observed. The daily mean VAS in WL was lower for hunger, desire to eat and the prospective food consumption, and higher for fullness than in CON and WG ($p<0.001$). However, there was no interaction effect between the condition x time of the day on appetite sensations ($p>0.05$) (Figure 3).

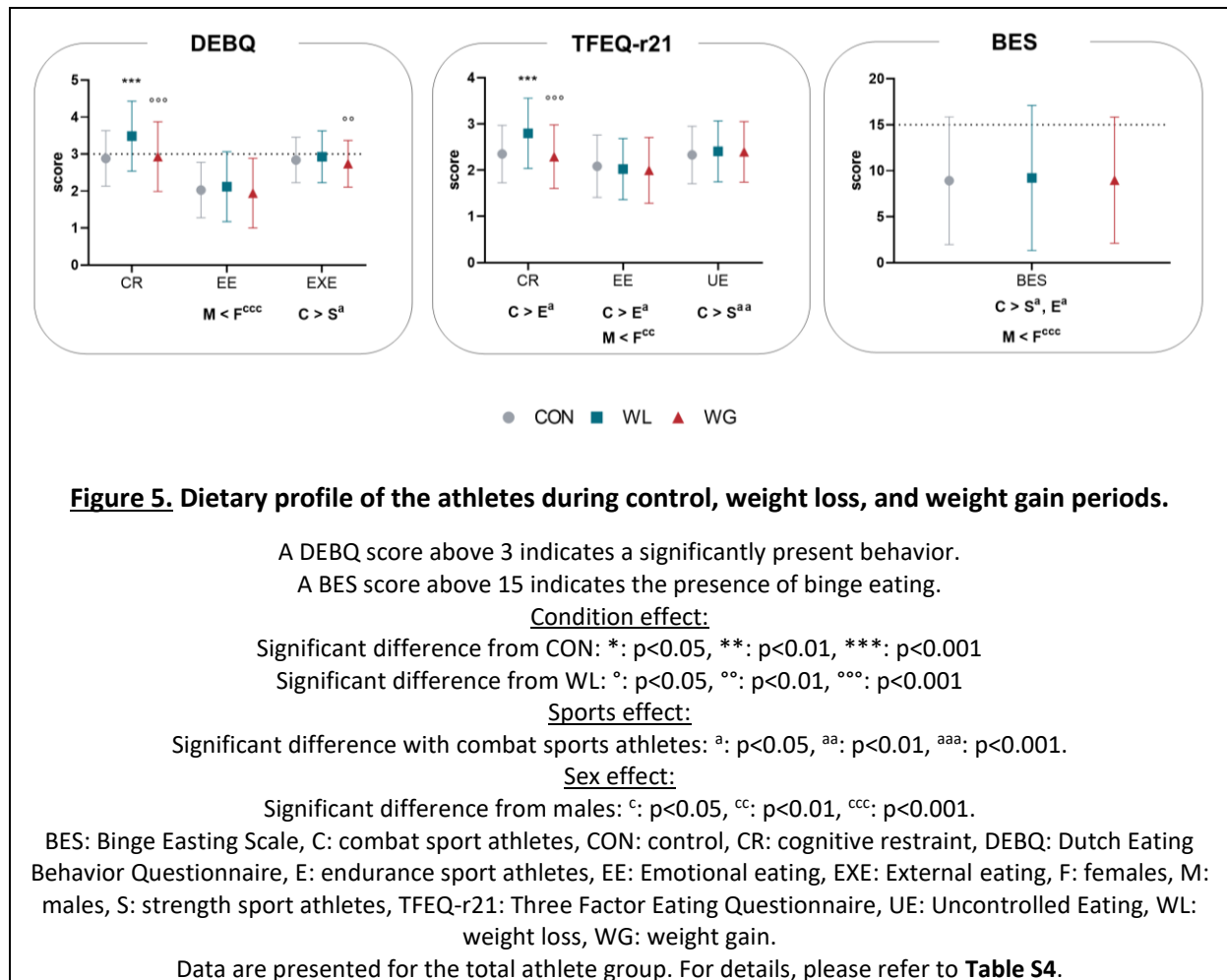


No condition effect was observed for SQ. However, a sport x condition effect was observed with a lower SQ in strength athletes for hunger at dinner in WL ($p < 0.05$) than CON and WG, and for fullness at lunch in WG than in WL ($p < 0.01$). A sex x condition effect was observed on some SQ. A greater decrease for fullness was observed for males than females in WL (breakfast: $p = 0.03$ and dinner: $p = 0.05$). A decrease for the desire to eat was observed in males while it was increased in females in WL (dinner: $p = 0.05$), and *vice versa* for the prospective food consumption (breakfast: $p = 0.05$).



3.5. Dietary profile

The athletes' dietary profile per condition is detailed in **Table S4** and illustrated in **Figure 5**. Overall, cognitive restraint was higher in WL than in the CON and WG conditions ($p < 0.001$, $p_{\text{sport}} = 0.05$). External eating was more important in WL than in WG ($p < 0.01$). While no condition effect was observed, a greater BES score was observed in combat sports athletes than other sports ($p < 0.05$), and females than males ($p < 0.001$). No group (sport or sex) x condition effects were observed ($p > 0.05$).



3.6. Food reward

Results for the LFPQ are detailed in **Table S5** and illustrated in **Figure 6**. Implicit and explicit wanting for fat, or calorie-dense foods, was higher in both WL ($p < 0.01$) and WG ($p < 0.001$) compared to the CON condition. However, the choice frequency for fat was only significantly higher in WG than in CON ($p < 0.01$). The explicit liking for fat was higher in WL ($p < 0.05$) than in CON, especially in strength athletes

($p=0.01$). The significant sport \times condition effect for explicit wanting ($p=0.03$) highlighted a higher score in WG than in CON in strength athletes ($p<0.01$).

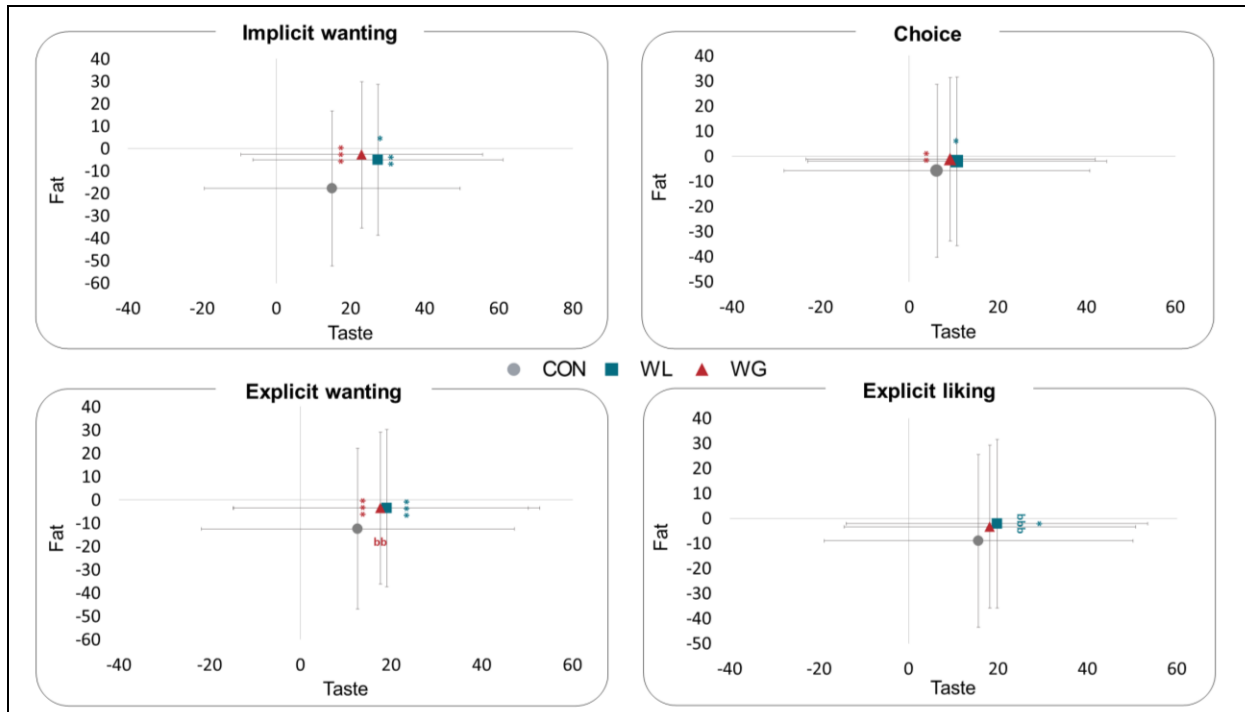


Figure 6. Food reward evolution of the athlete during control, weight loss, and weight gain periods.

Data are presented for the total athlete group. For details, please refer to **Table S5**.

Condition effect:

Significant difference with CON: *: $p<0.05$, **: $p<0.01$, ***: $p<0.001$.

Sports \times condition effect:

Significant difference with CON conditions in strength sports athletes only: ^{bb}: $p<0.01$, ^{bbb}: $p<0.001$.

Statistic symbols (*) and letters (^b) at the left or the right of score symbols (round, square, triangle) correspond to the fat (ordinate) outcome.

Statistic symbols (*) and letters (^b) above or below score symbols (round, square, triangle) correspond to the taste (abscissa) outcome.

Example of interpretation for the “explicit wanting” outcome:

Explicit wanting for fat was significantly higher in WL and WG than in CON ($p<0.001$).

While no condition effect for the total group, a sport effect was observed with a higher explicit wanting for taste in WG than in CON only in strength athletes ($p<0.01$).

CON: control, WL: weight loss, WG: weight gain.

4. DISCUSSION

Regular weight cycling has been suggested as a serious short to long-term risk factor for the development of eating disorders as well as excessive subsequent weight regain [17]. Nonetheless, it is recognized, whether for aesthetic- or weight-related performances, many sub-elite and elite athletes

engage in frequent WCE during their sporting seasons [4]. This practice may affect their mental and physical health [29], but to date, objective data on appetite control and eating behaviors remain scarce. As such, the present work aimed to assess the impact of an entire weight cycling episode on the dietary and appetitive profiles of such athletes, questioning the potential effect of sex and their practiced sport.

All of our enrolled athletes show a significant and logical decrease in their daily energy intake at WL compared with baseline, but the condition x sport interaction indicates an overall higher daily intake in endurance athletes that remains particularly higher on WL compared with combat athletes. This overall higher energy intake may be explained by their sport-specific higher volume of training that leads to a high energy need and thus a higher energy intake. Moreover, the lower usual weight loss amount observed in the athletes during the WCE contributes to explaining the lower energy intake between CON and WL and the higher intake at WL compared with the other athletes, particularly the combat ones.

Relative to the type of macronutrient ingested, strength-related sports athletes show a higher absolute consumption of proteins, while endurance ones consume more lipids. Similarly, strength-related athletes show an overall higher consumption of energy through proteins and lower carbohydrate compared with the other disciplines. These nutritional differences are not surprising due to the energetic specificities of each sport. Interestingly, however, our results show an overall greater relative consumption of protein compared with CON and WG. This result agrees with the conclusion of a recent cross-sectional study pointing that weight cycling athletes used to lose important degrees of their body weight, tend to consume more proteins and less fat, which might suggest a potential conscious control of their eating regulation to spare fat-free mass and favor fat mass loss [14]. Importantly, the present results do not show any increase in the athletes' energy intake on WG suggesting the absence of a potential post-rapid WL energy compensation that could partly contribute to BW and fat overshooting [17]. It must be however noticed that athletes show a continuously high level of physical activity and training during their season, which should maintain them in a nutritionally well-regulated zone [30], preventing then them from such a rebound.

None of the appetite feelings assessed were found different at WG compared to CON. Indeed, while daily hunger, prospective food consumption, and desire to eat are significantly higher and fullness significantly lower in WL compared to CON, all returned to initial values, without any rebound, after the restoration of the lost weight (WG). The findings of Blundell et al. support the constant high physical activity level of the athletes could play an important role in contributing to a coherent control of appetite related to the athletes' energy needs [30]. This absence of impaired appetite feeling is also

accompanied by a unchanged SQ at both WL and WG, indicating a preserved satietogenic capacity that might also contribute to avoiding any post-WL overconsumption and compensation. These results as such reinforce the hypothesis that even during a WL episode, maintaining a high physical activity level could prevent the activation of appetitive compensatory mechanisms that could favor overconsumption and then future extra-weight gain [31].

When it comes to food reward, while the implicit and explicit liking and wanting for sweets and fat are increased in response to WL, agreeing with available evidence in non-athletic people with normal-weight and overweight/obesity [32]. Our results indicate that the hedonic responses might not be only sensitive to moderate-to-long term WL but also rapid ones, pointing to the possible importance of the degree and/or rate of WL in these responses. Importantly however, contrarily to energy intake and appetite sensations, most of the components of food reward remained higher after WG compared with CON, either underlying the need for a longer period of weight stabilization after regain to normal values or suggesting here the potential activation of a hedonic compensatory mechanism to favor higher consumption after WL in athletes. If this is the case it might put them at risk for increased energy intake and weight gain rebound with training cessation/reduction (*e.g.*, such as in injured athletes after a competition). Although these results are the first in this population and the context of an entire effective WCE, they are in line with the conclusions from Zwaan et al., who described a higher overall reward sensitivity that might render weight cyclers vulnerable for weight regain [15]. However, further long-term studies are necessary on this point.

Eating disorders, assessed through binge eating, cognitive restriction, emotional, uncontrolled, or external eating, are frequently observed in athletes with a higher prevalence of such disorders in athletes than in the general population [12]. According to our findings, while the entire sample of participants showed low scores on the BES scale, combat athletes and women athletes reached scores tending to indicate an existing concern or tendency for developing binge eating. Although the TFEQ evaluation does not seem to indicate any impaired or at-risk eating behavior traits in our sample, cognitive restraint, emotional, and external eating assessed using the DEBQ show scores (especially in combat and strength sports, as well as in women) a rising awareness indicating altered eating behaviors and profiles. This supports previous studies conducted in similar populations and the responses approaching the diagnostic threshold for restrained and emotional eating (using the DEBQ questionnaire), potentially highlighting a sensibility for cognitive restriction and a sensitivity to external stimuli [14]. These dietary profiles do not seem however to be affected by a single WCE as WG values were not significantly different compared to baseline. This would suggest the need for partitioners to develop preventive strategies over the entire seasons and in-between seasons to avoid the long-term

installation of such impaired profiles in these athletes who are at risk. Indeed, only evaluating these dimensions in response to acute WCE might hide the potential slow development and instauration of long-term impaired eating behaviors in these athletes.

The present work has some strengths and limitations that have to be considered when interpreting the results. First, most studies in the field remain cross-sectional and retrospective, comparing data between auto-declared weight cyclers and non-weight cyclers, the use here of an effective WCE episode is the main strength of our study. The main limitation is certainly the reduced degree of WL observed. Although a greater WL would have certainly favored a greater impact on the participants' appetite control and eating behavior traits, it must be noticed that it represented the participants' usual degree of weight reduction, representing then the reality of their practice. The lower number of female participants engaged in endurance activity compared with the combat and strength athletes is also to be considered a limitation. Finally, the sample size allowed us to perform some secondary analysis regarding a potential hormonal status through sexual dimorphism in these appetitive responses to weight cycling. However, the reduced number of users and non-users of hormonal contraceptives remains too low to provide related and specific results on ovarian hormonal status considerations.

5. PRACTICAL APPLICATIONS

Athletes used to weight cycling may exhibit eating behavior traits alterations, increasing the risk weight gain in the long term. Coaches should be aware of the nutritional impacts of weight cycling and advise athletes to consult health professionals and nutritionists to manage both weight loss and regain in alignment with their sport and objectives. Regular monitoring of appetite sensations and eating habits throughout WCE can help detect significant changes that might lead to eating disorders. Moreover, maintaining an elevated physical activity level during off season phases and post-career transition may contribute to appetite and food intake regulations, thereby reducing the risk of excessive long-term weight regain.

6. CONCLUSION

In conclusion, our findings support that an acute WCE does not seem to induce subsequent impaired appetitive responses in experienced weight cycling athletes. This could be due to their constant high physical training and activity level, preventing them from any acute dysregulation of their energy

intake control. However, their eating behavior traits, particularly in combat and female athletes, as a long-term indicator of their nutritional health, seem to be affected, which must lead practitioners to better consider the long-term impact of such weight loss practices.

Acknowledgment: The authors have no acknowledgments to declare.

Sources of Support: This work was realized as a part of the French “Plan de Relance” fund from the National Research Agency (ANR) and the International Health in Motion Chair.

Author Contributions: All authors read and approved the final version of the manuscript.

Author Declarations: The authors have no conflicts of interest to declare.

REFERENCES

- [1] Coswig VS, Miarka B, Pires DA, da Silva LM, Bartel C, Del Vecchio FB. Weight Regain, but not Weight Loss, Is Related to Competitive Success in Real-Life Mixed Martial Arts Competition. *International Journal of Sport Nutrition & Exercise Metabolism* 2019;29:1–8.
- [2] Drid P, Figlioli F, Lakicevic N, Gentile A, Stajer V, Raskovic B, et al. Patterns of rapid weight loss in elite sambo athletes. *BMC Sports Science, Medicine & Rehabilitation* 2021;13:1–7.
- [3] Brechney GC, Cannon J, Goodman SP. Effects of Weight Cutting on Exercise Performance in Combat Athletes: A Meta-Analysis. *Int J Sports Physiol Perform* 2022;17:995–1010. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2021-0104>.
- [4] Bagot S, Péliissier L, Pereira B, Chanséaume Bussiere E, Duclos M, Dulloo A, et al. Weight regain, body composition, and metabolic responses to weight loss in weight cycling athletes: A systematic review and meta-analyses. *Obes Rev* 2024;25:e13658. <https://doi.org/10.1111/obr.13658>.
- [5] Lakicevic N, Matthews JJ, Artioli GG, Paoli A, Roklicer R, Trivic T, et al. Patterns of weight cycling in youth Olympic combat sports: a systematic review. *Journal of Eating Disorders* 2022;10:75. <https://doi.org/10.1186/s40337-022-00595-w>.
- [6] Andersen RE, Barlett SJ, Morgan GD, Brownell KD. Weight loss, psychological, and nutritional patterns in competitive male body builders. *Int J Eat Disord* 1995;18:49–57. [https://doi.org/10.1002/1098-108x\(199507\)18:1<49::aid-eat2260180106>3.0.co;2-c](https://doi.org/10.1002/1098-108x(199507)18:1<49::aid-eat2260180106>3.0.co;2-c).
- [7] Pettersson S, Pipping Ekström M, Berg CM. The food and weight combat. A problematic fight for the elite combat sports athlete. *Appetite* 2012;59:234–42. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2012.05.007>.
- [8] Steen SN, Brownell KD. Patterns of weight loss and regain in wrestlers: has the tradition changed? / Modalites de perte de poids et de reprise de poids chez des lutteurs: la tradition a-t-elle change ? *Medicine & Science in Sports & Exercise* 1990;22:762–8.
- [9] Thiel A, Gottfried H, Hesse FW. Subclinical eating disorders in male athletes. A study of the low weight category in rowers and wrestlers. *Acta Psychiatr Scand* 1993;88:259–65. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0447.1993.tb03454.x>.
- [10] Fogelholm GM, Koskinen R, Laakso J, Rankinen T, Ruokonen I. Gradual and rapid weight loss: effects on nutrition and performance in male athletes. / Perte ponderale progressive et rapide: effets sur la nutrition et la performance chez des athletes de sexe masculin. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 1993;25:371–7.
- [11] Fogelholm M. Effects of bodyweight reduction on sports performance. *Sports Med* 1994;18:249–67. <https://doi.org/10.2165/00007256-199418040-00004>.
- [12] Sundgot-Borgen J, Torstveit MK. Prevalence of eating disorders in elite athletes is higher than in the general population. *Clin J Sport Med* 2004;14:25–32. <https://doi.org/10.1097/00042752-200401000-00005>.
- [13] Bratland-Sanda S, Sundgot-Borgen J. Eating disorders in athletes: overview of prevalence, risk factors and recommendations for prevention and treatment. *Eur J Sport Sci* 2013;13:499–508. <https://doi.org/10.1080/17461391.2012.740504>.
- [14] Bagot S, Pereira B, Miles-Chan J, Gryson C, Chanséaume Bussiere E, Duclos M, et al. The habitual degree of weight loss might be associated with specific fat and protein intakes in weight-cycling athletes: preliminary results from the WAVE study. *Nutrition Research (In Press)* 2024.
- [15] Zwaan M, Engeli S, Müller A. Temperamental factors in severe weight cycling. A cross-sectional study. *Appetite* 2015;91:336–42. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2015.04.064>.
- [16] Blundell JE, Gibbons C, Beaulieu K, Casanova N, Duarte C, Finlayson G, et al. The drive to eat in homo sapiens: Energy expenditure drives energy intake. *Physiol Behav* 2020;219:112846. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2020.112846>.

- [17] Dulloo AG, Jacquet J, Girardier L. Poststarvation hyperphagia and body fat overshooting in humans: a role for feedback signals from lean and fat tissues. *Am J Clin Nutr* 1997;65:717–23. <https://doi.org/10.1093/ajcn/65.3.717>.
- [18] Sedeaud A, Marc A, Marck A, Dor F, Schipman J, Dorsey M, et al. BMI, a Performance Parameter for Speed Improvement. *PLOS ONE* 2014;9:e90183. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090183>.
- [19] Artioli GG, Scagliusi F, Kashiwagura D, Franchini E, Gualano B, Junior AL. Development, validity and reliability of a questionnaire designed to evaluate rapid weight loss patterns in judo players. *Scand J Med Sci Sports* 2010;20:e177-187. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2009.00940.x>.
- [20] Pélissier L, Ennequin G, Bagot S, Pereira B, Lachèze T, Duclos M, et al. Lightest weight-class athletes are at higher risk of weight regain: results from the French-Rapid Weight Loss Questionnaire. *Phys Sportsmed* 2022;1–9. <https://doi.org/10.1080/00913847.2021.2014285>.
- [21] Lluch A, Kahn JP, Stricker-Krongrad A, Ziegler O, Drouin P, Méjean L. Internal validation of a French version of the Dutch eating behaviour questionnaire. *European Psychiatry* 1996;11:198–203. [https://doi.org/10.1016/0924-9338\(96\)88391-X](https://doi.org/10.1016/0924-9338(96)88391-X).
- [22] Tholin S, Rasmussen F, Tynelius P, Karlsson J. Genetic and environmental influences on eating behavior: the Swedish Young Male Twins Study. *The American Journal of Clinical Nutrition* 2005;81:564–9. <https://doi.org/10.1093/ajcn/81.3.564>.
- [23] Brunault P, Gaillard P, Ballon N, Couet C, Isnard P, Cook S, et al. Validation de la version française de la Binge Eating Scale : étude de sa structure factorielle, de sa consistance interne et de sa validité de construit en population clinique et non clinique. *L'Encéphale* 2016;42:426–33. <https://doi.org/10.1016/j.encep.2016.02.009>.
- [24] Finlayson G, King N, Blundell JE. Is it possible to dissociate “liking” and “wanting” for foods in humans? A novel experimental procedure. *Physiol Behav* 2007;90:36–42. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2006.08.020>.
- [25] Thivel D, Oustric P, Beaulieu K, Moore H, Bonjean L, Loglisci J, et al. Development, sensitivity and reliability of a French version of the Leeds food preference questionnaire (LFPQ-fr) for the evaluation of food preferences and reward. *Physiol Behav* 2023;267:114187. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2023.114187>.
- [26] Julia C, Méjean C, Touvier M, Péneau S, Lassale C, Ducrot P, et al. Validation of the FSA nutrient profiling system dietary index in French adults-findings from SUVIMAX study. *Eur J Nutr* 2016;55:1901–10. <https://doi.org/10.1007/s00394-015-1006-y>.
- [27] Drapeau V, King N, Hetherington M, Doucet E, Blundell J, Tremblay A. Appetite sensations and satiety quotient: predictors of energy intake and weight loss. *Appetite* 2007;48:159–66. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2006.08.002>.
- [28] McNair D, Lorr M, Droppleman LF. *Manual for the Profile of Mood States*, 1971.
- [29] Martínez-Aranda LM, Sanz-Matesanz M, Orozco-Durán G, González-Fernández FT, Rodríguez-García L, Guadalupe-Grau A. Effects of Different Rapid Weight Loss Strategies and Percentages on Performance-Related Parameters in Combat Sports: An Updated Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health* 2023;20:5158. <https://doi.org/10.3390/ijerph20065158>.
- [30] Blundell JE, Gibbons C, Caudwell P, Finlayson G, Hopkins M. Appetite control and energy balance: impact of exercise. *Obes Rev* 2015;16 Suppl 1:67–76. <https://doi.org/10.1111/obr.12257>.
- [31] Miles-Chan JL, Isacco L. Weight cycling practices in sport: A risk factor for later obesity? *Obes Rev* 2021;22 Suppl 2:e13188. <https://doi.org/10.1111/obr.13188>.
- [32] Oustric P, Gibbons C, Beaulieu K, Blundell J, Finlayson G. Changes in food reward during weight management interventions – a systematic review. *Obesity Reviews* 2018;19:1642–58. <https://doi.org/10.1111/obr.12754>.

SUPPLEMENTARY TABLES

Table S1. Participants' profile, body weight and composition, and mood profile per type of sports and sex.

	TOTAL (N = 48)	SPORT			SEX						
		p-value Condition	Combat (N = 23)	Strength (N = 12)	Endurance (N = 13)	Sport	Condition x Sport	Females (N = 20)	Males (N = 28)	Sex	Condition x Sex
PARTICIPANTS' PROFILE AND USUAL WEIGHT MANAGEMENT											
Age (years)	24.6 ± 5.7	na	23.0 ± 3.9	26.1 ± 5.4	26.0 ± 7.9	0.32	na	25.7 ± 5.9	23.0 ± 5.0	0.08	na
Sports practice (h/week)	11.5 ± 4.6	na	10.8 ± 5.1	11.6 ± 4.0	12.7 ± 4.4	0.30	na	11.7 ± 4.2	11.1 ± 5.3	0.43	na
Usual WL duration (d)	26.1 ± 25.3	na	17.4 ± 15.7	40.1 ± 39.0	29.5 ± 19.8	0.07	na	24.5 ± 23.0	28.2 ± 28.5	0.72	na
Usual WL (kg)	3.0 ± 1.8	na	3.0 ± 1.0	4.0 ± 3.1	1.9 ± 0.6 ^{aa,b}	0.007	na	3.1 ± 1.7	2.8 ± 2.0	0.24	na
Usual WL (%)	4.9 ± 3.4	na	4.5 ± 1.7	6.1 ± 4.9	3.1 ± 0.9 ^a	0.02	na	4.4 ± 2.3	4.8 ± 3.5	0.79	na
RWLQ score	26.0 ± 13.4	na	35.2 ± 9.6	23.5 ± 10.4 ^{aa}	12.1 ± 6.0 ^{aaa,bb}	<0.001	na	25.3 ± 13.2	27.1 ± 13.6	0.66	na
WL AND WG DURATIONS OF THE WCE DURING THE WAVE STUDY											
WL duration (d)	37.2 ± 29.8	na	25.0 ± 23.7	47.6 ± 38.4	49.9 ± 24.0 ^{aa}	<0.001	na	34.9 ± 27.7	40.4 ± 32.9	0.63	na
WG duration (d)	49.4 ± 42.5	na	29.2 ± 37.5	60.6 ± 43.9 ^a	78.4 ± 30.6 ^{aa}	<0.001	na	43.5 ± 32.5	58.7 ± 54.7	0.80	na
ANTHROPOMETRY AND BODY COMPOSITION DURING THE WAVE STUDY											
Height (cm)	171.4 ± 8.4	na	171.4 ± 8.8	170.1 ± 8.6	172.7 ± 7.8	0.42	na	165.2 ± 6.7	175.9 ± 6.3	<0.001	na
BMI (kg.m ⁻²)	CON	23.2 ± 2.6		23.8 ± 2.3	24.6 ± 2.6	21.0 ± 1.5	<0.001 endurance ^{aaa,bbb}	22.8 ± 2.3	23.5 ± 2.8	0.28	0.39
	WL	22.0 ± 2.2 ^{***}	<0.001	22.6 ± 2.2	23.0 ± 1.8	20.2 ± 1.4		21.7 ± 2.0	22.4 ± 2.3		
	WG	23.1 ± 2.2 ^{ooo}		23.4 ± 1.7	24.4 ± 2.4	21.2 ± 1.5		22.6 ± 1.5	23.5 ± 2.5		
Body weight (kg)	CON	68.5 ± 10.9		70.1 ± 10.4	71.7 ± 13.1	62.8 ± 7.5	0.08	62.5 ± 9.8	72.8 ± 8.1	<0.001	0.78
	WL	65.0 ± 9.9 ^{***}	<0.001	66.8 ± 9.9	66.7 ± 11.3	60.5 ± 7.6		59.3 ± 8.8	69.2 ± 8.5		
	WG	68.5 ± 9.4 ^{ooo}		68.7 ± 8.9	71.0 ± 12.6	65.4 ± 5.9		61.7 ± 5.0	72.6 ± 9.1		
Fat mass (%)	CON	18.7 ± 6.7		17.2 ± 6.4	16.2 ± 4.8	14.1 ± 5	0.37	21.6 ± 4.1	12.2 ± 2.6	<0.001	0.25
	WL	17.1 ± 6.5 ^{***}	<0.001	15.8 ± 6.4	15.2 ± 5.3	12.7 ± 4.2		19.9 ± 4.5	11.1 ± 2.8		
	WG	18.0 ± 5.7 ^{ooo}		15.5 ± 5.8	16.2 ± 5.2	13.7 ± 4.6		21.0 ± 3.4	11.7 ± 2.4		
Fat-free mass (kg)	CON	52.9 ± 9.0		57.0 ± 9.9	59.3 ± 13.6	52.9 ± 7.4	0.30	47.6 ± 6.0	62.8 ± 8.0	<0.001	0.45
	WL	51.4 ± 8.9 ^{***}	<0.001	55.2 ± 9.6	55.9 ± 12.5	51.9 ± 7.1		46.4 ± 6.0	60.4 ± 7.2		
	WG	53.5 ± 8.9 ^{ooo}		57.1 ± 10.5	58.9 ± 13.2	55.1 ± 5.2		47.6 ± 4.5	62.9 ± 8.1		
Hydration (%)	CON	58.9 ± 5.2		58.3 ± 5.5	57.5 ± 3.8	61.4 ± 5.3	0.16	54.8 ± 4.1	61.9 ± 3.7	<0.001	0.99
	WL	60.5 ± 5.2 ^{***}	<0.001	60 ± 5.6	59.2 ± 4.2	62.5 ± 4.8		56.3 ± 4.2	63.6 ± 3.3		
	WG	59.7 ± 4.5 ^{ooo}		59.6 ± 4.6	58.2 ± 3.7	61.4 ± 4.9		55.3 ± 2.5	62.3 ± 3.2		
MOOD PROFILE											
Tension											

	CON	8.9 ± 5		10.6 ± 4.7	7.8 ± 5.4	6.9 ± 4.5	0.01 endurance ^{aa}	0.40	10.8 ± 4.7	7.5 ± 4.8	0.001	0.36
	WL	9.3 ± 6.2	0.88	11.3 ± 6.2	9.3 ± 8	6 ± 2.6			12.5 ± 7.5	6.9 ± 3.8		
	WG	9 ± 6.2		10 ± 5.8	10.6 ± 7.8	5.6 ± 4.2			11.2 ± 5.6	7.8 ± 6.4		
Anger	CON	10.6 ± 7		12.7 ± 8.6	7.5 ± 3.1	9.6 ± 5.6	0.09	<0.001	11.1 ± 6.6	10.3 ± 7.4	0.24	0.29
	WL	12.4 ± 8.6	0.38	15.5 ± 9.9	11.1 ± 7.3	8.2 ± 5.3			15 ± 10.1	10.4 ± 6.9		
	WG	10.9 ± 8.4		10 ± 7.2	15.9 ± 10.7*	7.2 ± 6.1			11.4 ± 6.8	10.6 ± 9.5		
Confusion	CON	7.8 ± 4.4		8.9 ± 5.2	7.1 ± 4.3	6.8 ± 2.8	0.06	0.35	8.5 ± 4.1	7.4 ± 4.7	0.03	0.25
	WL	9.2 ± 5.1	0.19	10.1 ± 5.2	10.6 ± 5.6	6.5 ± 3.9			11 ± 6.3	7.9 ± 3.7		
	WG	8 ± 5.4		8.7 ± 6.3	9.4 ± 4.8	5.4 ± 3			10 ± 6	6.9 ± 4.7		
Depression	CON	8.1 ± 7.5		10.2 ± 8.9	7.4 ± 6.3	5.2 ± 4.7	0.04 endurance ^a	0.14	9.6 ± 7.8	7.1 ± 7.3	0.01	0.70
	WL	9.4 ± 11.9	0.67	13 ± 14.4	9.5 ± 11.2	3.6 ± 2.8			12.2 ± 14.8	7.4 ± 8.8		
	WG	9.3 ± 10.1		9.7 ± 9.8	13.4 ± 12	4.2 ± 6.5			11.9 ± 9.2	7.8 ± 10.5		
Fatigue	CON	8.2 ± 5.2		9.5 ± 5.4	7.8 ± 5.4	6.4 ± 4.5	0.02 endurance ^a	0.65	11 ± 5	6.3 ± 4.6	0.003	0.34
	WL	11 ± 6**	0.01	12.4 ± 6.1	12.4 ± 5.3	7.8 ± 5.7			12.2 ± 7.3	10.2 ± 5		
	WG	8.3 ± 6.6°		9.3 ± 6.4	10.2 ± 7.7	4.6 ± 4.8			10.9 ± 5.9	6.9 ± 6.7		
Vigour	CON	19 ± 4.6		19.5 ± 4.1	18.8 ± 6.9	18.3 ± 3.3	0.96	0.77	16.8 ± 3.8	20.6 ± 4.7	0.01	0.09
	WL	16.9 ± 4.8*	0.03	16.8 ± 4.1	16.2 ± 7	17.7 ± 4.1			16.6 ± 5.2	17.2 ± 4.7		
	WG	18.1 ± 4.3		17.8 ± 3.4	18.3 ± 6.2	18.8 ± 4			16.1 ± 3.3	19.4 ± 4.5		

Condition effect: Significant difference from CON: *: p<0.05, **: p<0.01, ***: p<0.001. Significant difference from WL: °: p<0.05, °°: p<0.01, °°°: p<0.001.

Sports effect: Significant difference with combat sports athletes: ^a: p<0.05, ^{aa}: p<0.01, ^{aaa}: p<0.001. Significant difference with strength sports athletes: ^b: p<0.05, ^{bb}: p<0.01, ^{bbb}: p<0.001.

Sex effect: Significant difference from males: ^c: p<0.05, ^{cc}: p<0.01, ^{ccc}: p<0.001.

CON: control condition, RWLQ: Rapid Weight Loss Questionnaire, WCE: weight cycling episode, WL: weight loss, WG: weight gain.

Table S2. Energy intake evolution of athletes according to their sports and sex.

	TOTAL (N = 48)	SPORT				p-value		SEX		p-value	
		Condition	Combat (N = 23)	Strength (N = 12)	Endurance (N = 13)	Sport	Condition x Sport	Females (N = 20)	Males (N = 28)	Sex	Condition x Sex
EI (kcal/day)											
CON	2522 ± 725		2432.2 ± 498	2582.6 ± 790.4	2627.2 ± 1001.1			2079.3 ± 398.4	2839.3 ± 744.7		
WL	1685 ± 817***	<0.001	1255.7 ± 680.8***	1895.8 ± 788	2315.6 ± 612.9 ^{aaa}	0.06	<0.001	1248.8 ± 607.4	1992.4 ± 814.1	<0.001	0.16
WG	2295 ± 766 ^{ooo}		2219.4 ± 722.2 ^{ooo}	2562.3 ± 913.9	2180.6 ± 699.5			2077.9 ± 620.8	2432.3 ± 826.9		
Protein (g)											
CON	115 ± 42		106.3 ± 33.5	150.8 ± 53.4	100.3 ± 29.8		<0.001	97.7 ± 26.8	128.7 ± 47.9		
WL	83 ± 45***	<0.001	66.2 ± 38*** ^b	111.9 ± 63.3	91.3 ± 21.5		strength ^{aaa}	61.4 ± 26.9	99.3 ± 49.8	0.001	0.68
WG	109 ± 55 ^{ooo}		99.4 ± 45.6 ^{ooo} ^b	153.5 ± 73.5 ^{oo}	87.6 ± 26.3 ^b		endurance ^{bb}	87.9 ± 33	123.9 ± 62.8		
Lipid (g)											
CON	89 ± 32		89.3 ± 26.5	89.9 ± 37.6	91.1 ± 38.7		0.02	76.7 ± 21.9	99.4 ± 35.5		
WL	61 ± 51***	<0.001	38.7 ± 23.7***	69.5 ± 46.1	99.1 ± 70.9 ^a		endurance ^a	37.9 ± 22.8	78.7 ± 59	<0.001	0.24
WG	83 ± 35 ^{oo}		75.8 ± 30.4 ^{oo}	95.9 ± 45.8	87.2 ± 30.7			72.8 ± 28.8	90.6 ± 37.4		
CHO (g)											
CON	288 ± 102		281.4 ± 75.2	262.8 ± 88.9	323.9 ± 145.5			231.8 ± 63.5 ^{cc}	328.5 ± 106.3		
WL	182 ± 99***	<0.001	149.6 ± 88.3	171.4 ± 71	256.2 ± 109.7	0.07	0.09	152.2 ± 84.7**	204.1 ± 105***	0.01	0.03
WG	260 ± 78 ^{ooo}		262 ± 79.9	252 ± 68.7	268 ± 91.3			248.9 ± 65.7 ^{ooo}	268.6 ± 86.1** ^o		
Protein (%EI)											
CON	18.8 ± 5.9		17.7 ± 5.3	23.7 ± 5.8	16.3 ± 4.7		<0.001	19.3 ± 6.0	18.5 ± 6.0		
WL	20.8 ± 7.2**	0.01	21.7 ± 7.5	24.3 ± 7.9	16.1 ± 2.6		strength ^{aa}	20.4 ± 5.3	21.2 ± 8.4	0.39	0.02
WG	18.8 ± 6.2 ^o		18 ± 6.5	23.2 ± 4.4	16.1 ± 5.2		endurance ^{bbb}	17.0 ± 5.0 ^o	20.0 ± 6.7		
Lipid (%EI)											
CON	31.8 ± 6.0		32.9 ± 6.3	30.9 ± 6.1	31 ± 5.9			32.9 ± 5.3	31.1 ± 6.5		
WL	29.1 ± 10.2	0.09	27.1 ± 8.9	30.3 ± 13.4	31.9 ± 9.2	0.47	0.25	26.4 ± 9.9	31.1 ± 10.2	0.03	0.07
WG	31.9 ± 5.7		30.5 ± 5.4	32.8 ± 6.2	34 ± 5.7			31.1 ± 5.4	32.5 ± 6		
CHO (%EI)											
CON	45.5 ± 7.3		46.2 ± 7.6	40.6 ± 5.8	48.7 ± 6.4		<0.001	44.4 ± 7.4	46.3 ± 7.3		
WL	45.7 ± 10.6	0.95	47.6 ± 9.2	38.7 ± 12.4	48.6 ± 9.5		strength ^{aaa}	48.9 ± 9.5	43.5 ± 11	0.12	0.01
WG	45.9 ± 7.0		47.9 ± 6.5	40.9 ± 7.3	47 ± 5.5		endurance ^{bbb}	48.6 ± 5.1	44.2 ± 7.6		

Condition effect: Significant difference from CON: *: p<0.05, **: p<0.01, ***: p<0.001. Significant difference from WL: °: p<0.05, °°: p<0.01, °°°: p<0.001.

Sports effect: Significant difference with combat sports athletes: ^a: p<0.05, ^{aa}: p<0.01, ^{aaa}: p<0.001. Significant difference with strength sports athletes: ^b: p<0.05, ^{bb}: p<0.01, ^{bbb}: p<0.001.

Sex effect: Significant difference with males: ^c: p<0.05, ^{cc}: p<0.01, ^{ccc}: p<0.001.

CON: control condition, CHO: carbohydrates, EI: energy intake, WL: weight loss, WG: weight gain.

Table S3. Appetite sensations evolution of athletes according to their sports and sex.

	TOTAL	p-value		SPORT		Sport	p-value		SEX		p-value	
		Condition	Combat	Strength	Endurance		Sport x Condition	Females	Males	Sex	Condition x Sex	
HUNGER												
N	48		23	12	13			20	28			
VAS pre-breakfast (mm)												
CON	55.2 ± 24.4		55.1 ± 25.8	60.6 ± 29.4	50.2 ± 16.5			55.7 ± 24.9	54.8 ± 24.5			
WL	58.3 ± 21.7	0.55	58.3 ± 22.8	60.2 ± 23.9	57 ± 20.1	0.52	0.56	54.5 ± 20.9	61.1 ± 22.3	0.50	0.58	
WG	52.8 ± 23.9		48 ± 24.3	57.3 ± 23.2	58.9 ± 23.9			52.4 ± 22.1	53.1 ± 25.4			
VAS post-breakfast (mm)												
CON	26.5 ± 26.2		26.2 ± 25.9	26.9 ± 33	26.6 ± 22.1			28.2 ± 29.3	25.2 ± 24.1			
WL	30.4 ± 24.8	0.08	32.3 ± 26.7	39.3 ± 27.9	21.7 ± 18.3	0.35	0.09	26.6 ± 26	33 ± 24.2	0.87	0.19	
WG	22.7 ± 20.4		25.2 ± 22.3	22.3 ± 24.3	18.6 ± 12			30.7 ± 27.5	18.3 ± 13.8			
SQ breakfast (mm/kcal)												
CON	8.3 ± 9.1		10.6 ± 11.5	7.5 ± 7.8	5.4 ± 4.1			11.2 ± 11.4	6.3 ± 6.5			
WL	9.2 ± 8	0.36	10.6 ± 9	9.7 ± 10.2	7.4 ± 5.3	0.63	0.25	11.9 ± 10.3	7 ± 4.6	0.13	0.06	
WG	6.5 ± 6.4		4.6 ± 8	8.5 ± 4.7	7.8 ± 3.8			4.7 ± 8.6	7.5 ± 4.8			
VAS pre-lunch (mm)												
CON	70.3 ± 18.2		67 ± 20.2	79.4 ± 15.4	67.7 ± 14.9			64.7 ± 21.1	74.2 ± 14.9			
WL	70.6 ± 16.5	0.47	71.7 ± 14.2	66.2 ± 22.1	71.8 ± 16.4	0.28	0.09	68.6 ± 16.2	72 ± 16.8	0.10	0.57	
WG	66.8 ± 16.4		61.6 ± 18.9	72.5 ± 13.3	72.9 ± 7.2			64.7 ± 19.8	68.1 ± 14			
VAS post-lunch (mm)												
CON	22 ± 20.3		20.4 ± 20.1	25.5 ± 27.8	21.7 ± 13.3			24.8 ± 20.2	20 ± 20.5			
WL	31.7 ± 25.2*	<0.01	37.7 ± 25.3	40.5 ± 30.6**	16.6 ± 13.8	0.23	0.01	31.7 ± 26.1	31.7 ± 25	0.55	0.54	
WG	21.6 ± 16.7°		22.7 ± 18.4	19.7 ± 17.1	21.1 ± 13.5			26.6 ± 21	18.2 ± 12.5			
SQ lunch (mm/kcal)												
CON	7.1 ± 3.5		7.4 ± 3.7	7.5 ± 3.4	6.5 ± 3.2			7.2 ± 3.5	7.1 ± 3.5			
WL	8.2 ± 6.7	0.56	9 ± 8.3	6.2 ± 7.2	7.9 ± 2.7	0.86	0.04	8.5 ± 5.4	7.8 ± 7.7	0.93	0.87	
WG	8.2 ± 6.3		6.2 ± 5.9	11.8 ± 8.2	8.6 ± 1.9			7.9 ± 8.7	8.5 ± 4.3			
VAS pre-dinner (mm)												
CON	71.4 ± 18.3		71.8 ± 18.3	66.5 ± 23.1	75.1 ± 13.2			68.1 ± 15.5	73.6 ± 20			
WL	70.6 ± 15.9	0.46	72.2 ± 15.6	72.4 ± 13.4	66.9 ± 18.1	0.09	<0.001	69.4 ± 13.6	71.4 ± 17.5	0.10	0.55	
WG	66.5 ± 24.1		54.1 ± 24.5	82.6 ± 11.1 *** ^{aaa}	78.7 ± 16.2 ^{aa}			59.6 ± 27.1	70.9 ± 21.3			
VAS post-dinner (mm)												
CON	19.9 ± 20.7		21.4 ± 20.2	26.2 ± 29.6	11.9 ± 6.4			17 ± 18.8	21.9 ± 22			
WL	31.8 ± 25.7**	<0.001	42 ± 27.8**	30.7 ± 25.4	15.9 ± 11.3 ^{aa}	0.08	0.03	33.7 ± 26.1	30.4 ± 25.8	0.56	0.21	
WG	17.3 ± 16.5 ^{oo}		17.6 ± 16.5 ^{ooo}	13.4 ± 16.1	20.6 ± 18.2			24.1 ± 20.8	13.4 ± 12.2			
SQ dinner (mm/kcal)												
CON	7.9 ± 4.3		7 ± 2.8	7.1 ± 5.5	9.9 ± 4.9			8.9 ± 3.7	7.1 ± 4.6			
WL	7.4 ± 13.8	0.94	11 ± 11.1	-4.3 ± 23.7* ^{aaa}	8.6 ± 5 ^{bb}	0.07	<0.001	7.8 ± 21.5	7.2 ± 5.3	0.59	0.93	

	WG	7.5 ± 5.1		5.7 ± 4.3	10.2 ± 6.6 ^{°°}	8.3 ± 3.7		8.3 ± 7.6	7.1 ± 3.2			
FULLNESS												
N		47		22	12	13		19	28			
VAS pre-breakfast (mm)												
	CON	36.2 ± 26.1		35.4 ± 24.1	40.4 ± 34.2	33.3 ± 21.6		39.1 ± 25.8	34 ± 26.6			
	WL	33.8 ± 23.6	0.06	32.7 ± 25.4	33.6 ± 18.4	35.6 ± 25.7	0.78	0.41	35.2 ± 23.3	32.7 ± 24.4	0.41	0.97
	WG	44.5 ± 27.7		50.3 ± 26.8	39.3 ± 24.8	36.9 ± 32		46.4 ± 28.4	43.3 ± 27.8			
VAS post-breakfast (mm)												
	CON	68.7 ± 23.8		62.8 ± 23.7	74 ± 30.7	74.3 ± 15.5		67.4 ± 25.3	69.7 ± 23.1			
	WL	61.5 ± 28.4	0.06	55.9 ± 34.1	54.4 ± 25.9	73.4 ± 17.6	0.05 endurance ^a	0.36	64.6 ± 31	59.3 ± 26.8	0.78	0.82
	WG	70.8 ± 23.2		65.1 ± 25.8	73.7 ± 25.5	78.8 ± 12		71.8 ± 23.2	70.3 ± 23.6			
SQ breakfast (mm/kcal)												
	CON	-8.2 ± 8.9		-8.5 ± 9.3	-8.1 ± 12.2	-7.9 ± 2.9		-8.4 ± 10.8	-8.1 ± 7.5			
	WL	-10.4 ± 15.2	0.18	-12.4 ± 19.7	-9.6 ± 16	-8.3 ± 7.4	0.96	0.26	-15.9 ± 19.9	-5.2 ± 5.9	0.19	0.03
	WG	-6.1 ± 8.7		-2.7 ± 9.2	-9.6 ± 8.7	-8.4 ± 6.2		-6.1 ± 8.8	-6.2 ± 8.9			
VAS pre-lunch (mm)												
	CON	31.1 ± 25		30.3 ± 24.8	35.4 ± 34	28.2 ± 14.1		31.6 ± 23.4	30.7 ± 26.5			
	WL	26.8 ± 19.2	0.21	23.1 ± 18.5	38 ± 22.1	25.9 ± 17.2	0.71	0.20	30.8 ± 20.8	23.7 ± 17.7	0.36	0.82
	WG	34.8 ± 21.2		38.3 ± 19.4	27.7 ± 18.8	34.1 ± 28.1		37.6 ± 21.9	32.9 ± 20.9			
VAS post-lunch (mm)												
	CON	76.9 ± 16.3		74.7 ± 16.1	81.1 ± 17.2	76.6 ± 16.1		73.8 ± 17.9	79 ± 15			
	WL	57.6 ± 28.6 ^{***}	<0.001	54.4 ± 29.7	44.6 ± 32.7	70.9 ± 19.7	0.24	0.11	56.2 ± 31.7	58.7 ± 26.7	0.70	0.71
	WG	73.8 ± 22.1 ^{°°°}		73.4 ± 20.4	70 ± 29.4	79 ± 17.9		73.6 ± 21.9	73.9 ± 22.7			
SQ lunch (mm/kcal)												
	CON	-6.7 ± 5.3		-6.7 ± 6.4	-6.7 ± 4.6	-6.9 ± 4		-6.8 ± 6.4	-6.7 ± 4.5			
	WL	-7 ± 8.9	0.83	-9.2 ± 10.2	0.7 ± 3.6	-8.3 ± 6.2	0.67	<0.001	-7.2 ± 8.2	-6.9 ± 9.7	0.29	0.45
	WG	-7.8 ± 9.1		-5.2 ± 5.9	-12.3 ± 13.6 ^{°°}	-8.2 ± 7.1		-10.2 ± 11.2	-6.1 ± 7.1			
VAS pre-dinner (mm)												
	CON	29.1 ± 24.7		26.2 ± 22.5	39.1 ± 33.7	24.2 ± 14.2		28.9 ± 22.8	29.3 ± 26.3			
	WL	25.4 ± 22.9	0.21	21.4 ± 19.4	25.7 ± 19.4	31.5 ± 29.5	0.83	0.03	23.4 ± 20.4	26.7 ± 24.7	0.74	0.39
	WG	32.7 ± 23.5		38.6 ± 22	25.9 ± 23.3	25.1 ± 26.1		37.3 ± 24.9	29.7 ± 22.6			
VAS post-dinner (mm)												
	CON	74.4 ± 20.3		73.9 ± 21.7	70.4 ± 21.1	78.8 ± 17.9		76 ± 21.2	73.3 ± 20			
	WL	62.8 ± 29.9 [*]	<0.01	53.2 ± 31.2	63 ± 36.3	78.1 ± 16.6	0.15	0.26	61.9 ± 32.2	63.3 ± 28.9	0.93	0.89
	WG	77 ± 23.4 [°]		77.8 ± 22.3	73.7 ± 31.3	78.3 ± 18.6		77.5 ± 20.4	76.7 ± 25.3			
SQ dinner (mm/kcal)												
	CON	-6.6 ± 5.3		-6.6 ± 3.5	-5.7 ± 7.2	-7.5 ± 6.2		-6.7 ± 5.6	-6.6 ± 5.2			
	WL	-9 ± 8.9	0.12	-10.3 ± 10.7	-4.8 ± 6.3	-9.1 ± 6.9	0.30	0.59	-13.3 ± 10.2 ^{*c}	-6.3 ± 6.9	0.08	0.05
	WG	-6.2 ± 5.9		-5.8 ± 5.4	-5.8 ± 6.2	-7.6 ± 7.2		-6.8 ± 6.5	-5.9 ± 5.7			
DESIRE TO EAT												
N		25		14	6	5		11	14			
VAS pre-breakfast (mm)												

	CON	51.6 ± 25.6		50.1 ± 25.6	46.9 ± 31.8	61 ± 19.4			50.6 ± 27.8	52.3 ± 24.6		
	WL	67.4 ± 18.5*	0.03	68.8 ± 22.1	66.1 ± 16.4	66.4 ± 17.4	0.48	0.61	57.4 ± 15.2	71.7 ± 18.6	0.30	0.50
	WG	56.7 ± 20.2		49.9 ± 21.6	63 ± 17.5	64 ± 18.3			56.5 ± 19	56.7 ± 21.3		
VAS post-breakfast (mm)												
	CON	24.7 ± 22.1		23.5 ± 16.8	15.1 ± 23.6	37.4 ± 31.1			29.5 ± 28	20.3 ± 14.8		
	WL	45.1 ± 30.6**	<0.001	55.3 ± 33.6*	54 ± 21.1*	20.8 ± 22.6	0.56	0.02	43.4 ± 27.4	45.7 ± 32.7	0.30	0.53
	WG	22.2 ± 23.4 ^{ooo}		25.3 ± 26.1	23.4 ± 25.7	14.2 ± 15.9			35.3 ± 32.5	17.3 ± 17.9		
SQ breakfast (mm/kcal)												
	CON	9 ± 9		8.8 ± 10.7	11.2 ± 8.5	6.6 ± 4.9			9 ± 7.7	8.9 ± 10.4		
	WL	8.8 ± 10	0.72	5.9 ± 7.2	9.5 ± 15.6	11.2 ± 9.3	0.51	0.70	11 ± 12.4	7.4 ± 8.8	0.87	0.69
	WG	7.4 ± 3.7		5.2 ± 2.9	8.8 ± 4	8.9 ± 3.1			6.5 ± 5.6	7.7 ± 3		
VAS pre-lunch (mm)												
	CON	69.8 ± 18.8		71.5 ± 12.9	66.9 ± 33.2	68.5 ± 12.9			70.6 ± 13.7	69.2 ± 22.5		
	WL	79.9 ± 11.4*	0.02	81.4 ± 12.8	76.3 ± 10.5	80.6 ± 10.2	0.69	0.11	77.3 ± 13.8	81.3 ± 10.2	0.94	0.77
	WG	69.6 ± 14.4°		61.9 ± 15.8	78.4 ± 5.4	75.9 ± 9.8			70.9 ± 16.9	69.1 ± 13.8		
VAS post-lunch (mm)												
	CON	16.9 ± 17.3		15.2 ± 16.3	13.4 ± 23.3	25.7 ± 11.2			22.5 ± 20	12.5 ± 14.1		
	WL	41.1 ± 31.2***	<0.001	50.6 ± 32.7	41.3 ± 32	21.8 ± 21.2	0.53	0.10	53.4 ± 27.2	35 ± 32.1	0.01	0.80
	WG	22.3 ± 17.1 ^{oo}		23.8 ± 17.5	21.4 ± 21.9	20.3 ± 10.7			31.4 ± 23.5	18.3 ± 12.4		
SQ lunch (mm/kcal)												
	CON	6.6 ± 2.9		6.5 ± 2.8	7.2 ± 4.5	6.2 ± 0.9			7.4 ± 3.2	6 ± 2.6		
	WL	8.9 ± 8.9	0.41	10.7 ± 12.1	5.3 ± 5.3	8.9 ± 3.5	0.93	0.21	7.6 ± 5.1	9.8 ± 10.8	0.90	0.52
	WG	8.1 ± 5.3		6.6 ± 3.1	9.8 ± 8.6	8.9 ± 1.9			9 ± 9.1	7.7 ± 2.4		
VAS pre-dinner (mm)												
	CON	72.2 ± 21.5		74.6 ± 17.3	65.8 ± 33.1	73.2 ± 18.6			73.5 ± 18.7	71.2 ± 24.1		
	WL	76.5 ± 16.8	0.35	80.6 ± 10.9	77.6 ± 9.2	66.9 ± 29	0.71	0.07	76.7 ± 6.5	76.4 ± 20.1	0.55	0.86
	WG	68.8 ± 20		61.9 ± 21.7	81.1 ± 15.1	68.2 ± 16.1			73.5 ± 24.7	66.9 ± 18.3		
VAS post-dinner (mm)												
	CON	21.4 ± 20.4		24.3 ± 19.1	19.1 ± 32.1	15.5 ± 9.2			26.8 ± 26.3	16.8 ± 13		
	WL	40.7 ± 29.8**	<0.001	57.8 ± 26.1***	31.1 ± 26.1	16.3 ± 19.3 ^{aaa}	0.04 endurance ^a	0.01	53.3 ± 27	35.5 ± 30.1	0.10	0.54
	WG	17.7 ± 14 ^{ooo}		16.3 ± 11.6 ^{ooo}	18.9 ± 16.9	19 ± 17.7			20.5 ± 16.9	16.8 ± 13.5		
SQ dinner (mm/kcal)												
	CON	7.3 ± 3.5		6.6 ± 2.5	7.4 ± 5.8	9.1 ± 3.1			8.3 ± 3.9	6.4 ± 3		
	WL	6.7 ± 6.2	0.84	7.2 ± 4.6	2.6 ± 9	9.3 ± 4.8	0.10	0.22	3.7 ± 6.8	8.2 ± 5.5	0.51	0.04
	WG	6.6 ± 3.7		5.4 ± 2.8	7.5 ± 4.7	8 ± 4.1			6.9 ± 5.4	6.5 ± 3.1		
PROSPECTIVE FOOD CONSUMPTION												
N		47		22	12	13			19	28		
VAS pre-breakfast (mm)												
	CON	55.9 ± 25.7		58.4 ± 25.9	45.2 ± 28	62.2 ± 21.2			54.4 ± 26.1	57 ± 25.8		
	WL	66.1 ± 23.4	0.07	67.7 ± 22.6	65.1 ± 28.1	64.4 ± 22.9	0.85	0.31	61.8 ± 22.8	69.3 ± 23.9	0.25	0.89
	WG	55.2 ± 23.3		52 ± 25.3	61.9 ± 17.6	55.8 ± 24.7			51.9 ± 24	57.4 ± 23.2		
VAS post-breakfast (mm)												

	CON	34.9 ± 27.4		34.6 ± 25.6	31.7 ± 32.3	38.3 ± 27.7			32.4 ± 29.1	36.9 ± 26.4		
	WL	47.2 ± 27.4*	<0.001	52.9 ± 28.4	52.5 ± 25.9	36.6 ± 25.6	0.45	0.11	40 ± 27.2	52.5 ± 26.8	0.41	0.14
	WG	32.6 ± 21.4°		37.1 ± 25.1	26.8 ± 19.9	29.9 ± 13.3			37.7 ± 26.3	29.8 ± 18		
SQ breakfast (mm/kcal)												
	CON	6.4 ± 8.5		7.3 ± 9	5.6 ± 10	5.6 ± 6			7.7 ± 9	5.4 ± 8.1		
	WL	6.4 ± 8.8	0.77	7 ± 9.3	5.7 ± 12.9	6 ± 5.8	0.96	0.39	9.3 ± 11.4	3.7 ± 3.9	0.32	0.05
	WG	5.4 ± 5		3.6 ± 4.5	8.9 ± 5.2	4.7 ± 3.8			3.7 ± 5.5	6.4 ± 4.6		
VAS pre-lunch (mm)												
	CON	63.6 ± 25.2		67.2 ± 22.7	54.2 ± 34.5	66.5 ± 17.4			63.3 ± 22.5	63.9 ± 27.4		
	WL	77 ± 19.4*	<0.01	80.7 ± 18.9	68.7 ± 20.8	76 ± 19.2	0.21	0.58	72 ± 22.4	80.9 ± 16.1	0.58	0.48
	WG	67.3 ± 18.1		65.6 ± 18	67.3 ± 19.6	72 ± 18.1			68.3 ± 19.8	66.6 ± 17.3		
VAS post-lunch (mm)												
	CON	26.9 ± 18.3		27 ± 16.9	22 ± 21.2	31.2 ± 18.3			27.3 ± 19	26.6 ± 18.2		
	WL	48 ± 29.1***	<0.001	54.9 ± 28.7	47.7 ± 29.4	36.9 ± 28.1	0.65	0.13	48.2 ± 28.2	47.8 ± 30.3	0.72	0.95
	WG	31.8 ± 23°°°		31.6 ± 22.7	28.2 ± 25.9	36.2 ± 22.4			34.5 ± 25.2	30 ± 21.8		
SQ lunch (mm/kcal)												
	CON	5.5 ± 5		5.9 ± 6.2	4.7 ± 3.9	5.6 ± 4			6 ± 6.1	5.1 ± 4.2		
	WL	4.8 ± 4.9	0.76	5.2 ± 4.4	0.6 ± 5.6	6.4 ± 4.4	0.28	0.43	4.5 ± 5.3	5.1 ± 4.7	0.35	0.43
	WG	5.9 ± 8.1		4.9 ± 4.4	6.5 ± 14.1	7.3 ± 5.1			7.6 ± 8.7	4.7 ± 7.6		
VAS pre-dinner (mm)												
	CON	68.8 ± 20.8		69.4 ± 19.5	62.2 ± 25.9	74.7 ± 16.5			67.4 ± 18.8	69.7 ± 22.3		
	WL	72.1 ± 19.8	0.35	76.8 ± 19.3	66.3 ± 21	68.2 ± 19.6	0.28	0.19	67.8 ± 21.5	75.1 ± 18.4	0.37	0.79
	WG	65.9 ± 24.2		62 ± 21.1	64.2 ± 30.7	78.4 ± 21.9			64.6 ± 27.3	66.7 ± 22.4		
VAS post-dinner (mm)												
	CON	30.8 ± 22.8		33.2 ± 23.1	35.8 ± 27	22.4 ± 17.4			26.8 ± 24.1	33.6 ± 22		
	WL	45.8 ± 30**	<0.001	57.4 ± 29.6	34.3 ± 28.4	33.2 ± 25.5	0.21	0.07	46.4 ± 31.1	45.4 ± 30	0.79	0.63
	WG	25.7 ± 23.2°°°		25.3 ± 21.1	22.2 ± 17.4	29.6 ± 32			26.8 ± 22.4	25.1 ± 24		
SQ dinner (mm/kcal)												
	CON	6.1 ± 4.7		5.1 ± 3.7	5.4 ± 5	8.7 ± 5.5			6.7 ± 4.7	5.7 ± 4.8		
	WL	5.6 ± 6.3	0.78	6.2 ± 5.9	2.2 ± 7.4	6.4 ± 6.5	0.14	0.43	5 ± 6.9	6 ± 6.1	0.37	0.08
	WG	6.2 ± 6.2		5.1 ± 6.3	6.4 ± 5.2	8.2 ± 7.1			8.5 ± 7.8	4.9 ± 4.9		

Condition effect: Significant difference from CON: *: p<0.05, **: p<0.01, ***: p<0.001. Significant difference from WL: °: p<0.05, °°: p<0.01, °°°: p<0.001.

Sports effect: Significant difference with combat sports athletes: ^a: p<0.05, ^{aa}: p<0.01, ^{aaa}: p<0.001. Significant difference with strength sports athletes: ^b: p<0.05, ^{bb}: p<0.01, ^{bbb}: p<0.001.

Sex effect: Significant difference with males: ^c: p<0.05, ^{cc}: p<0.01, ^{ccc}: p<0.001.

CON: control condition, SQ: satiety quotient, VAS: visual analog scale, WL: weight loss, WG: weight gain.

Table S4. Dietary profile evolution of athletes according to their sports and sex.

	TOTAL (N = 48)	SPORT				p-value		SEX		p-value	
		Condition	Combat (N = 23)	Strength (N = 12)	Endurance (N = 13)	Sport	Condition x Sport	Females (N=20)	Males (N=28)	Sex	Condition x Sex
DEBQ											
Cognitive restraint											
CON	2.8 ± 0.7		3 ± 0.4	3.1 ± 0.7	2.6 ± 1.1			3.1 ± 0.6	2.8 ± 0.8		
WL	3.4 ± 0.9***	<0.001	3.7 ± 0.9	3.7 ± 0.8	3.0 ± 1.1	0.05	0.80	3.7 ± 1	3.3 ± 0.9	0.09	0.85
WG	2.8 ± 0.6 ^{ooo}		3.1 ± 0.7	3 ± 1.1	2.5 ± 1.1			3.3 ± 0.7	2.7 ± 1		
Emotional eating											
CON	2.0 ± 0.8		2.3 ± 0.8	1.8 ± 0.7	1.7 ± 0.8			2.4 ± 0.8	1.8 ± 0.8		
WL	2.1 ± 0.8	0.13	2.3 ± 0.7	2 ± 1	1.9 ± 1	0.06	0.51	2.5 ± 0.7	1.8 ± 0.9	0.004	0.81
WG	1.9 ± 0.8		2.3 ± 0.9	1.7 ± 0.6	1.5 ± 0.8			2.3 ± 1	1.7 ± 0.7		
External eating											
CON	2.8 ± 0.6		3 ± 0.6	2.5 ± 0.6	2.8 ± 0.6			3 ± 0.5	2.7 ± 0.7		
WL	2.9 ± 0.7	0.01	3.2 ± 0.6	2.6 ± 0.7	2.8 ± 0.8	0.03	1.00	3.1 ± 0.6	2.8 ± 0.8	0.12	0.82
WG	2.7 ± 0.6 ^{oo}		2.9 ± 0.6	2.5 ± 0.7	2.7 ± 0.7	strength ^a		2.9 ± 0.6	2.6 ± 0.7		
TFEQ											
Uncontrolled eating											
CON	2.3 ± 0.6		2.5 ± 0.5	2 ± 0.5	2.3 ± 0.7			2.4 ± 0.6	2.3 ± 0.7		
WL	2.4 ± 0.6	0.53	2.7 ± 0.5	2.1 ± 0.7	2.2 ± 0.8	0.01	0.94	2.5 ± 0.5	2.3 ± 0.7	0.61	0.28
WG	2.4 ± 0.6		2.6 ± 0.5	2.1 ± 0.7	2.3 ± 0.8	strength ^{aa}		2.4 ± 0.7	2.4 ± 0.7		
Cognitive restraint											
CON	2.3 ± 0.6		2.5 ± 0.4	2.4 ± 0.6	2.1 ± 0.9			2.5 ± 0.5	2.2 ± 0.6		
WL	2.8 ± 0.7***	<0.001	3.1 ± 0.7	2.9 ± 0.6	2.3 ± 0.8	0.03	0.23	3 ± 0.9	2.7 ± 0.7	0.11	0.83
WG	2.3 ± 0.7 ^{ooo}		2.5 ± 0.5	2.2 ± 0.7	2 ± 0.9	endurance ^a		2.5 ± 0.4	2.2 ± 0.8		
Emotional eating											
CON	2.1 ± 0.6		2.4 ± 0.6	1.9 ± 0.8	1.8 ± 0.6			2.3 ± 0.6	1.9 ± 0.7		
WL	2.0 ± 0.6	0.46	2.1 ± 0.6	1.9 ± 0.7	1.9 ± 0.7	0.03	0.10	2.3 ± 0.5	1.8 ± 0.7	0.01	0.92
WG	1.9 ± 0.7		2.3 ± 0.7	1.8 ± 0.7	1.7 ± 0.6	endurance ^a		2.2 ± 0.7	1.8 ± 0.7		
BES											
CON	8.9 ± 6.9		11.8 ± 7.7	7.4 ± 5.1	5.2 ± 4.7	0.001		12.2 ± 8.3	6.6 ± 4.6		
WL	9.2 ± 7.9	0.73	13 ± 8.5	5.8 ± 4.9	5.8 ± 6.2	strength ^a	0.58	12.6 ± 9.5	6.7 ± 5.3	0.001	0.36
WG	8.9 ± 6.8		11.8 ± 7.8	6.2 ± 4.5	6.4 ± 4.9	endurance ^{aa}		12.1 ± 8.7	7.1 ± 4.7		

Condition effect: Significant difference from CON: *: p<0.05, **: p<0.01, ***: p<0.001. Significant difference from WL: °: p<0.05, °°: p<0.01, °°°: p<0.001.

Sports effect: Significant difference with combat sports athletes: ^a: p<0.05, ^{aa}: p<0.01, ^{aaa}: p<0.001. Significant difference with strength sports athletes: ^b: p<0.05, ^{bb}: p<0.01, ^{bbb}: p<0.001.

Sex effect: Significant difference from males: ^c: p<0.05, ^{cc}: p<0.01, ^{ccc}: p<0.001.

BES: Binge Eating Questionnaire, CON: control condition, DEBQ: Dutch Eating Behavior Questionnaire, TFEQ: Three Factors Eating Questionnaire, WL: weight loss, WG: weight gain.

Table S5. Food reward evolution of athletes according to their sports and sex.

		TOTAL (N = 48)	SPORT				p-value		SEX		p-value	
	Condition		Combat (N = 23)	Strength (N = 12)	Endurance (N = 13)	Sport	Condition x Sport	Females (N = 20)	Males (N = 28)	Sex	Condition x Sex	
IMPLICIT WANTING												
Fat	CON	-17.80 ± 34.53	-13.5 ± 36	-30.6 ± 33.7	-13.6 ± 32.1			-10.4 ± 32	-23.1 ± 35.9			
	WL	-4.96 ± 33.71**	-6.8 ± 35.9	0.9 ± 37.2	-6.7 ± 28.3	0.75	0.21	-7 ± 29.1	-3.4 ± 37.2	0.35	0.11	
	WG	-2.75 ± 32.57***	2.8 ± 30.8	-9.1 ± 35.1	-7 ± 34.4			4.7 ± 29.7	-7.3 ± 33.9			
Taste	CON	15.06 ± 46.19	17.9 ± 45.9	-7 ± 54.2	30.3 ± 32.2			23.9 ± 37	8.7 ± 51.5			
	WL	27.37 ± 40.35*	20 ± 38.4	23.8 ± 51.5	43.4 ± 30.7	0.29	0.08	24.6 ± 40	29.4 ± 41.2	0.58	0.11	
	WG	23.07 ± 44.54	20.5 ± 50.9	20.9 ± 38.2	30.7 ± 39.8			26 ± 42.6	21.3 ± 46.4			
CHOICE												
Fat	CON	-5.78 ± 11.54	-3.9 ± 11.5	-10.8 ± 11.3	-4.4 ± 11.3			-2.3 ± 9.1	-8.3 ± 12.5			
	WL	-2.04 ± 12.78	-2.6 ± 13.5	0.5 ± 13.2	-3.2 ± 11.8	0.67	0.11	-2.1 ± 10.8	-2 ± 14.3	0.20	0.16	
	WG	-1.17 ± 12.12**	1.3 ± 11.3	-3.9 ± 13.1	-3.1 ± 12.8			1.8 ± 10.7	-3 ± 12.8			
Taste	CON	6.23 ± 15.96	7.2 ± 17.7	-0.2 ± 16.8	10.4 ± 10.3			9.6 ± 13.3	3.8 ± 17.5			
	WL	10.78 ± 14.81*	8.2 ± 15	9.1 ± 16.5	16.8 ± 12.1	0.42	0.11	10.1 ± 14.3	11.3 ± 15.4	0.54	0.10	
	WG	9.28 ± 17.07	8.7 ± 20.1	8.8 ± 14.2	11.1 ± 14.5			10.4 ± 16.8	8.6 ± 17.5			
EXPLICIT WANTING												
Fat	CON	-12.36 ± 18.62	-8.9 ± 20.0	-19.4 ± 20.0	-12 ± 13.6			-7.9 ± 15.3	-15.5 ± 20.4			
	WL	-3.56 ± 18.90***	-5.6 ± 19.1	0.9 ± 18.9	-3.7 ± 19.3	0.65	0.07	-4.0 ± 18.1	-3.2 ± 19.8	0.33	0.26	
	WG	-3.49 ± 13.99***	-0.2 ± 13.5	-9.2 ± 12.8	-3.9 ± 15.3			-0.9 ± 13.4	-5.1 ± 14.4			
Taste	CON	12.63 ± 25.88	12.5 ± 25.9	1.1 ± 28.6	23.5 ± 19.5			14.3 ± 24.1	11.5 ± 27.5			
	WL	19.04 ± 26.23	15.8 ± 27.2	10.9 ± 27.2	31.7 ± 20.3	0.18	0.03	17.5 ± 30.9	20.2 ± 22.8	0.87	0.70	
	WG	17.69 ± 26.37	14.1 ± 30.7	21.4 ± 23.8**	20.8 ± 20.2			17 ± 24.7	18.1 ± 27.8			
EXPLICIT LIKING												
Fat	CON	-8.91 ± 18.93	-4.4 ± 17.6	-19.3 ± 20.9	-7.4 ± 16.8			-7 ± 17.8	-10.3 ± 19.9			
	WL	-2.07 ± 17.57*	-3.4 ± 17.1	3.1 ± 15.1***	-4.2 ± 20.6	0.53	0.01	-1.5 ± 18.2	-2.5 ± 17.4	0.46	0.88	
	WG	-3.32 ± 14.93	-1 ± 15.1	-8.1 ± 16.1	-2.7 ± 13.4			-0.8 ± 15.8	-4.8 ± 14.4			
Taste	CON	15.62 ± 25.83	18.6 ± 27	2.1 ± 27.9	22.9 ± 17.6			15 ± 21.8	16.1 ± 28.8			
	WL	19.76 ± 25.88	16.6 ± 27.2	14.3 ± 27.6	30 ± 20.2	0.30	0.03	18.1 ± 28.7	21 ± 24.1	0.93	0.83	
	WG	18.18 ± 25.27	16.9 ± 27.7	18.8 ± 28.4	20.2 ± 17.5			17.1 ± 27.8	18.8 ± 24.2			

Condition effect: Significant difference from CON: *: p<0.05, **: p<0.01, ***: p<0.001. Significant difference from WL: °: p<0.05, °°: p<0.01, °°°: p<0.001.

Sports effect: Significant difference with combat sports athletes: ^a: p<0.05, ^{aa}: p<0.01, ^{aaa}: p<0.001. Significant difference with strength sports athletes: ^b: p<0.05, ^{bb}: p<0.01, ^{bbb}: p<0.001

Sex effect: Significant difference with males: ^c: p<0.05, ^{cc}: p<0.01, ^{ccc}: p<0.001.

CON: control condition, WL: weight loss, WG: weight gain.

AXE II

—

**CONSIDÉRATIONS MÉTHODOLOGIQUES
SPÉCIFIQUES AUX TRAVAUX DE RECHERCHE
CHEZ LA FEMME**

Méthodologie générale



Le manque de considération et de qualité des études sur la femme dans le domaine des sciences du sport et de l'exercice nous ont conduit à réaliser deux études méthodologiques :

Étude 1 : Un outil terrain de caractérisation du statut hormonal ovarien et des variations de poids chez les athlètes féminines : le questionnaire Answ'Her.

Étude 2 : Étude du métabolisme à l'exercice chez la femme : considérations pratiques et défis pour une recherche de qualité.

I. Méthodologie générale de l'étude 1

La phase de développement du questionnaire Answ'Her a consisté à identifier les critères de caractérisation du statut hormonal ovarien et de gestion du poids dans la littérature scientifique. Plusieurs sections ont ainsi été définies : i) informations générales et anthropométriques, ii) description du statut hormonal ovarien actuel et historique depuis la puberté, iii) statut hormonal ovarien et symptômes perçus associés, iv) statut hormonal ovarien, perception de la pratique sportive et de la performance, v) description de la pratique sportive et des compétitions, vi) gestion du poids corporel, vii) variations habituelles du poids corporel, viii) perspectives sur les futures modifications du poids corporel.

Une première phase de pré-test de ce questionnaire en ligne a été réalisée auprès de 22 athlètes féminines correspondant aux critères d'inclusion, afin d'ajuster la formulation des questions et d'optimiser la redirection entre les sections en fonction des réponses données. Par la suite, une large diffusion a été effectuée auprès des athlètes féminines *via* email, clubs sportifs et réseaux sociaux, entre décembre 2021 et mars 2022.

Pour répondre à ce questionnaire, les participantes devaient être âgées de 18 à 45 ans et pratiquer une activité sportive régulière d'au moins 4 heures par semaine. Toute femme HC- avec ou sans troubles menstruels, HC+ ou enceinte était éligible. Les femmes en période de péri- ou postménopause étaient exclues. En complétant le questionnaire, les participantes ont été informées que leurs données seraient utilisées de manière anonyme dans le cadre de l'étude. Pour valider la répétabilité du questionnaire Answ'Her, les athlètes devaient y répondre trois fois à une semaine d'intervalle. Des rappels ont été envoyés par courriel par l'un des investigateurs de l'étude, et les participantes n'avaient pas accès à leurs réponses précédentes.

II. Méthodologie générale de l'étude 2

Les études investiguant l'influence du cycle menstruel et/ou de l'utilisation d'une contraception hormonale sur le métabolisme énergétique à l'exercice sous maximal étaient éligibles dans notre analyse. Les articles en anglais ont été identifiés *via* des revues systématiques, des méta-analyses et des recherches sur PubMed/MEDLINE jusqu'en novembre 2023. Pour être considérés, les articles identifiés devaient répondre aux critères d'inclusion suivants : i) inclure des femmes adultes en bonne santé, non enceintes, ni en péri- ni en postménopause, de tout niveau d'activité physique, ii) inclure au moins un groupe de femmes HC- avec une indication sur la ou les phases du cycle menstruel au cours desquelles les mesures ont été effectuées, ou au moins un groupe de femmes HC+, et iii) toute mesure de dépense énergétique, d'oxydation et/ou de mobilisation des substrats au cours d'un exercice prolongé sous-maximal constant (≥ 20 minutes, $\leq 75\% \dot{V}O_{2max}$) ou un exercice incrémental avec des données à l'état stable pendant au moins 5 minutes pour chaque stade considéré (avec au moins un stade $\leq 75\% \dot{V}O_{2max}$).

Pour évaluer la qualité méthodologique des articles inclus, les critères de références mentionnés par Elliott-Sale (2023) et Smith et al. (2022) ont été considérés et complété par des critères additionnels identifiés par notre équipe de recherche (détaillés dans la présentation de l'étude à venir). Un score allant de 0% à 100% a été attribué à chaque critère, puis moyenné pour refléter la qualité globale de la méthodologie et du recrutement, et donc la robustesse des résultats obtenus. Un score global inférieur à 20% était considéré comme très faible, un score faible se situait entre 21% et 50%, un score modéré entre 51% et 80%, et un score de haute qualité était supérieur à 80%. Les limites méthodologiques identifiées par les auteurs ont ensuite été recueillies dans la discussion de leurs résultats et/ou par mail.

ÉTUDE 1

Un outil terrain de caractérisation du statut hormonal ovarien et des variations de poids chez les athlètes féminines : le questionnaire Answ'Her

Publiée dans Journal of Sports Medicine and Physical Fitness, 2024

doi: 10.23736/S0022-4707.24.15879-3

**A REPRODUCIBLE, SELF-REPORTED, FIELD-BASED TOOL FOR MONITORING OVARIAN
HORMONE STATUS AND BODY WEIGHT VARIATIONS IN FEMALE ATHLETES: THE ANSW'HER
QUESTIONNAIRE.**

Running title: Athletes' ovarian and weight status

Sarah BAGOT^{1*}, Bruno PEREIRA², Céline LAMBERT², Léna PELISSIER¹, Emilie CHANSEAUME³, Martine DUCLOS⁴, Anthony C. HACKNEY^{5,6}, Kirsty J ELLIOTT-SALE⁷, David THIVEL¹, Laurie ISACCO¹

1. Laboratory of the Metabolic Adaptations to Exercise under Physiological and Pathological Conditions (AME2P), CRNH Auvergne, Clermont Auvergne University, Clermont-Ferrand, France. sarah.bagot@uca.fr lena.pelissier@uca.fr david.thivel@uca.fr laurie.isacco@uca.fr.

2. Biostatistics Unit, DRCl, CHU Clermont-Ferrand, Clermont-Ferrand, France. bpereira@chu-clermontferrand.fr; clambert@chu-clermontferrand.fr.

3. Nutrifizz, Clermont-Ferrand, France. emilie.cb@nutrifizz.fr.

4. Department of Sport Medicine and Functional Explorations, CHU Clermont-Ferrand, Clermont-Ferrand, France. mduclos@chu-clermontferrand.fr.

5. Department of Exercise & Sport Science, University of North Carolina, Chapel Hill, NC 27599, USA. ach@email.unc.edu.

6. Department of Nutrition, Gillings School of Global Public Health, University of North Carolina, Chapel Hill, NC 27599, USA.

7. Department of Sport and Exercise Sciences, Manchester Metropolitan University Institute of Sport, Manchester M15 6BH, UK. k.elliott-sale@mmu.ac.uk.

***Corresponding author:** Sarah BAGOT, Clermont Auvergne University, UPR 3533, Laboratory of the Metabolic Adaptations to Exercise under Physiological and Pathological Conditions (AME2P), CRNH Auvergne, Clermont-Ferrand, France. sarah.bagot@uca.fr.

ABSTRACT

Intra-individual factors like ovarian hormone profiles and body weight variations may influence sports practice and performance in female athletes and need to be characterized. The “Answ’Her” questionnaire was designed to develop a relevant and reproducible field-based tool to assess self-reported ovarian hormone status (natural menstrual cycle and hormonal contraceptive use) and body weight variations practices among female athletes. French females with a regular sports practice responded (once: n=210; twice: n=86; thrice: n=66) to this 73-item questionnaire reporting their ovarian hormone status, associated symptoms, perceived influence on sports practice, and body weight variations. Reproducibility was evaluated, then a descriptive cross-sectional analysis was conducted on athletes. Reproducibility was verified with 92% of Lin’s correlation concordance coefficients above 0.7 and 100% of weighted agreements above 70%. Ultimately 185 female athletes (23.0±4.8 years) were included in the cross-sectional analysis. Whether they used hormonal contraceptive (46.5%) or not (53.5%), most of the athletes perceived a negative impact of their ovarian hormone status on sports practice (78.7%) and performance (84.7%). Overall, 77.3% of the athletes had experienced body weight variations that were significantly associated with an interruption of menses (>3 months) and menses irregularity over the last three years. The Answ’Her questionnaire is a simple and effective reproducible field-based tool for the self-reported characterisation of female athlete ovarian hormone status and body weight variations. It could be used for a unique and simple overview of the athlete situation but also in a longitudinal design to assess the athlete’s evolution and/or effectiveness of implanted training strategies.

Keywords: female, sport, menstrual cycle, contraception, symptoms.

Abbreviations: BW: body weight, CI: confidence interval, HCU: hormonal contraceptive use, ICC: intraclass correlation coefficient, M/B-S: menstrual/bleeding symptoms, OC: oral contraceptive, NMC: natural menstrual cycle, OHS: ovarian hormone status, PM/PB-S: premenstrual/prebleeding symptoms, Q: question, RED-s: relative energy deficiency in sport, TR: test-retest, TRR: test-retest-retest.

1. INTRODUCTION

Many athletes are engaged in body weight (BW) management (*i.e.*, weight-control behaviour) due to the impact of anthropometric and body composition parameters on their performance. Depending on the type of sport, BW management (*i.e.*, voluntary weight loss and/or weight regain induced by energy balance modifications) can be adopted for aesthetic reasons (*e.g.*, bodybuilding, gymnastics), or relative to weight categories (*e.g.*, combat sports, weightlifting), to gain strength (*e.g.*, powerlifting, sumo wrestling), or to be leaner (*e.g.*, endurance sports) [1,2]. The methods used by athletes and their durations to achieve BW loss are highly variable [3,4]. Poorly managed BW variations (*i.e.*, fluctuations in BW due to the loss and/or (re)gain of BW within sports season) can have harmful consequences on athletes' performance and health [5,6].

Although BW variations are well studied and documented among male athletes, specific data on female athletes are more scarce [7,8]. Indeed, Bagot *et al.* [9] showed that female athletes only represent 10% of the population studied in sport science research looking at BW variations, leading to the common extrapolation of physiological adaptations observed in males to females. Such extrapolations can be incorrect and can lead to dangerous practices since females present physiological specificities that need consideration [10,11]. Among those specificities, their ovarian hormone status (OHS) (*i.e.*, natural menstrual cycle (NMC) and hormonal contraceptive use (HCU)) potentially affect components related to exercise performance. For example, natural and exogenous ovarian hormone variations may influence metabolism, brain functions, cardiorespiratory parameters, and physical fitness [12–14]. The impact of OHS on BW regulation, and associated body composition changes is poorly understood. Some studies conducted among active females have shown no significant variation in body composition during the menstrual cycle or between females using or not oral contraceptives (OC), regardless of the measurement method used (*i.e.*, skinfolds, bioimpedance, dual-energy x-ray absorption) [15,16]. Conversely, Thompson *et al.* [17] observed a significantly lower body adiposity of 0.5% in the late follicular phase (in the 24 hours following a positive luteinizing hormone test) compared to the mid-luteal phase (7 to 9 days after positive luteinizing hormone test) in NMC active females. In females using OC, they also reported a significantly higher body fat percentage of 0.4% and lower lean mass of 0.37 kg in the early hormonal phase (between days 11 and 14 of active pill) compared to the late one (between days 24 and 28 of active pill). Similarly, Kosar *et al.* [16] reported a higher BW in the mid-luteal phase than in the mid-follicular phase in recreationally active females. This heterogeneity between results could be related to the methodological discrepancies between studies but could also reflect a large inter- and intra-individual variability, suggesting the need to monitor these variables for better individualization of training.

The relationship between BW variations and OHS has been increasingly studied, but it remains difficult to obtain reliable information on these physiological variables in female athletes due to barriers such as social taboos or lack of knowledge of athletes themselves and coaches. Developing reproducible field-based tool appears thus necessary to characterize the athletes at a specific moment (*e.g.*, beginning of a sport season) but also in a training follow-up objective in order to determine the athlete's training adaptation (*e.g.*, training planning according to the perceived OHS-associated symptoms or perceived discomfort related to BW variations).

The lack of relevant, consistent, and simple tools to collect information of interest led us to raise the following objectives: i) to develop and test the reproducibility of a questionnaire self-reporting OHS, perceived associated symptoms and perceived influence on sport practice and performance, and BW variations; and then ii) to use this questionnaire to collect subjective data to depict OHS and BW variations patterns and their perceived interactions with sports practice and performance in French female athletes.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Questionnaire development and data collection

An online self-reported questionnaire, named "Answ'Her", was developed to characterize OHS and BW variations (*i.e.*, weight loss and weight regain voluntary induced or not over the current sport season) in female athletes (**Supplementary materials 1 and 2**). The development of the survey included a test phase piloted on 22 female athletes in accordance with the predetermined inclusion criteria (see following section). This pre-testing phase led to the reformulation of some questions, the correction of redirections according to the answers between the different parts of the questionnaire and also to the shortening of the questionnaire. The resultant 73-item self-reported questionnaire was divided into different sections related to: i) general information and anthropometry parameters; ii) description of current OHS and its history since puberty (*i.e.*, NMC characterization and potential menstrual disorders, pregnancy, past and current HCU); iii) OHS and perceived associated symptoms (current situation for NMCs' menstruations or HCU's bleedings, or any time since menarche situations for secondary amenorrhea or pregnant females); iv) OHS and perceived sports practice (*i.e.*, the ability to practice sport during training or competition) and performance (*i.e.*, the athlete feeling about her maximal capacity and/or final result, such as ranking, distance, time, *etc.* during training or competition); v) description of the sport practice and competition; vi) BW management; vii) habitual BW variations; and viii) projection on future BW changes. Access to each section was conditioned by the answers to the previous questions (*e.g.*, Q18: "I do not use contraception, but I have used it in the

past” leads to the section “your contraceptive history” only), in order to avoid any mistake and to avoid participants fill in inappropriate sections. The terms premenstrual/prebleeding symptoms (PM/PB-S) and menstrual/bleeding symptoms (M/B-S) were used to describe symptoms, which the participants perceived were related to their NMCs or HCU. Specifically premenstrual/prebleeding referred to symptoms experienced in the week prior to menstruation or bleeding associated with their hormonal contraceptive usage, and M/B-S referred to symptoms experienced during menstruation or bleeding associated with hormonal contraceptive use (*e.g.*, the oral contraceptive pill free week and resultant withdrawal bleed). Five to 20 minutes were required to complete the questionnaire, which was personalized and adapted to each female participant’s situation.

2.2. Participants

Cis-gender females between 18 and 45 years with a regular sport practice of at least four hours per week for at least two years were eligible for this study. The following ovarian hormone profiles were eligible: NMC with or without menstrual disorders, HCU, and pregnant females; and the following ovarian hormone profiles were excluded: peri- or post-menopausal.

The recruitment was held from December 2021 to March 2022 using advertisements on social media, as well as e-mail campaigns. Participants were invited to follow a web link provided in the e-mail or in the advertisement with a QR code to access the information form and complete the confidential self-report Answ’Her questionnaire on Google Forms. By completing the questionnaire, all participants were informed that their data would be used anonymously in the study. The participants were asked to complete the Answ’Her questionnaire three times at one-week intervals. Reminders were sent by e-mail by one of the investigators of the study, and participants did not have any access to their previous answers *via* the questionnaire.

2.3. Statistical analyses

Sample size estimation was fixed according to COSMIN recommendations [18] in order to guarantee a satisfactory statistical power for the primary objective of this work, *i.e.* to develop and test the reproducibility of a questionnaire self-reporting OHS, perceived associated symptoms and perceived influence on sport practice and performance, and BW variations. Accordingly, it was decided to include a minimum of 100 participants for this descriptive cross-sectional study. For the analysis of reproducibility, at least 50 participants were needed to highlight a positive rating for reliability of at least 0.70 statistically [19]. In other words, at least 50 participants were needed to highlight reproducibility indexes (Lin’s concordance correlation coefficient for continuous variables and Cohen’s Kappa coefficient for categorical data) significantly greater than 0.7 (threshold for good to excellent

reproducibility) for 5% types I error and statistical power greater than 80%. Furthermore, Terwee et al. [19] also reported that a minimum number of 100 participants are necessary to ensure robust results to validate a questionnaire. Lastly, the analyses aiming to depict ovarian hormone status and BW variations patterns and their interactions with sports practice and performance in athletes were exploratory. But, with more than 200 participants, relevant effect-sizes greater than 0.5 could be highlighted for two-sided type I error at 5% and statistical power greater than 80%. Categorical data were expressed as number of female athletes and percentages, and continuous data as mean \pm standard deviation or median [25th; 75th percentiles]. The two-by-two evaluation time reproducibility of the Answ'Her scale was evaluated using Lin's concordance correlation coefficient for continuous variables, and (weighted) Cohen's Kappa coefficient, in addition to percent agreement, for categorical variables [19]. In the case of questions with multiple possible answers, the test-retest was established for each modality using a binary code (0: no, 1: yes). For two-to-three-time reproducibility, intraclass correlation coefficients (ICC) were then calculated from mixed models with participant as random effect. The results were interpreted according to Altman's recommendations: < 0.4: no concordance, 0.4-0.7: low concordance, > 0.7: moderate to strong concordance. Furthermore, Kappa coefficient and percent agreement were interpreted together [19].

Comparisons between independent groups (*e.g.*, HCU or NMCs, strong or low perceived impact of the OHS on sport practice) were performed with Chi-squared test or Fisher's exact test for categorical variables, and with ANOVA or Kruskal-Wallis test for continuous variables.

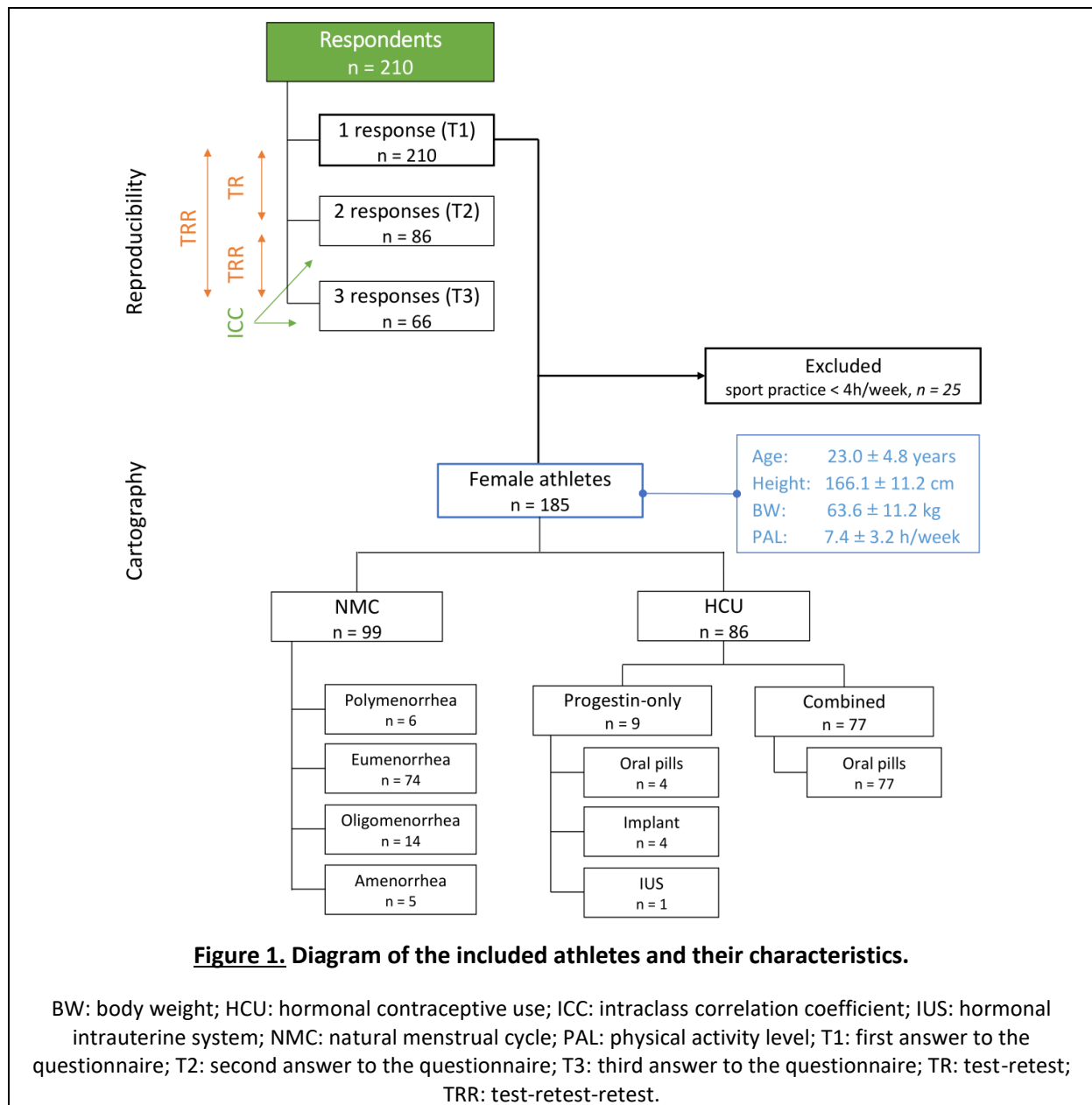
Statistical analysis was performed using Stata software (version 15; StataCorp, College Station, Texas, USA). All tests were two-sided (except for Kappa coefficient), with an alpha level set at 5%.

3. RESULTS

3.1. Reproducibility

A total of 210 females answered the questionnaire at least once (**Figure 1**). Subsequently, test-retest (TR) and test-retest-retest (TRR) evaluations were respectively performed on 86 and 66 respondents. Reproducibility was verified with: i) Lin's correlation coefficient ranging from 0.62 to 1.00 in the TR and from 0.49 to 1.00 in the TRR, and ii) weighted agreement ranging from 78.8% to 100% in the TR and from 74.4% to 100% in the TRR (**Supplementary material 3**). Weighted Kappa were above 0.4 in 90.2% of the TR and 84.8% of the TRR. A poor weighted Kappa (0.00-0.40) was observed for questions Q33, Q37, Q54, and Q68 which can be explained by the nature of these questions based on the feelings of the participants. Considering volunteers who answered the questionnaire two or three times, the ICC

regarding the main questions ranged from 0.51 to 0.99, except for the question concerning the realization of BW variations for aesthetic reasons (Q54b) (**Table S1**).



3.2. Descriptive cross-sectional study

3.2.1. Participants

Among the 210 respondents, data from 25 females were not considered for the descriptive cross-sectional analysis of the population due to a lack of compliance with the study inclusion criteria (sports practice < 4h/week). Subsequently, 185 females who practiced 7.4 ± 3.2 (mean ± SD) hours of sport per week were included. Twenty-six different sports were represented and were sorted by type as

presented in **Table S2**. Ovarian hormone status was detailed following the classification defined by Elliott-Sale *et al.* [11], referring to the NMC length and regularity or the type of HCU.

3.2.2. Self-reported ovarian hormone status, sports practice, and perceived performance

As shown in **Figure 1**, 46.5% of included athletes self-reported as HCUs and 53.5% as NMCs. Thirty-five percent of the NMC female athletes declared frequent irregular menses during the last three years (aesthetic: 75.0%, combat: 55.6%, strength: 36.4%, endurance: 42.9%, team: 18.9%, other: 25.0%), and 31.9% had experienced interrupted menses of three months or more since menarche (excluding pregnancy) (aesthetic: 25.0%, combat: 38.9%, strength: 36.4%, endurance: 53.3%, team: 21.1%, other: 25.0%). Two out of the five athletes with current self-reported amenorrhea never had their first menses. Thirty-eight current NMC athletes self-reported using hormonal contraceptive in the past (97.4% OC and 2.6% vaginal ring) and stopped 5.4 ± 3.8 years ago. Among the reasons mentioned, the following were repeatedly cited: side-effects (33.3%), the choice to stop exogenous hormones (27.8%), or because of the inconvenience of continuously taking the pill (8.3%). Regardless of NMCs or HCUs, 78.7% of the questioned athletes perceived that their OHS had an impact on their sports practice (weak: 29.5%, moderate: 38.3%, strong: 10.9%), and 84.7% on their performance (weak: 31.7%, moderate: 38.3%, strong: 14.8%).

3.2.3. Perceived premenstrual/hormonal contraceptive syndrome, menstrual/bleeding symptoms, sports practice, and performance

The frequency and intensity of the perceived PM/PB-S and M/B-S are presented in **Figure 2**. Considering PM/PB-S and M/B-S, the most frequently reported symptoms were abdominal/pelvic pain (81.8%), fatigue (77.9%), skin problems/acne (70.2%), mood changes (68.3%), and bloating (65.6%). They were all expressed with an intensity rated greater than 2 out of 5 for HCUs and 2.5 out of 5 for NMCs.

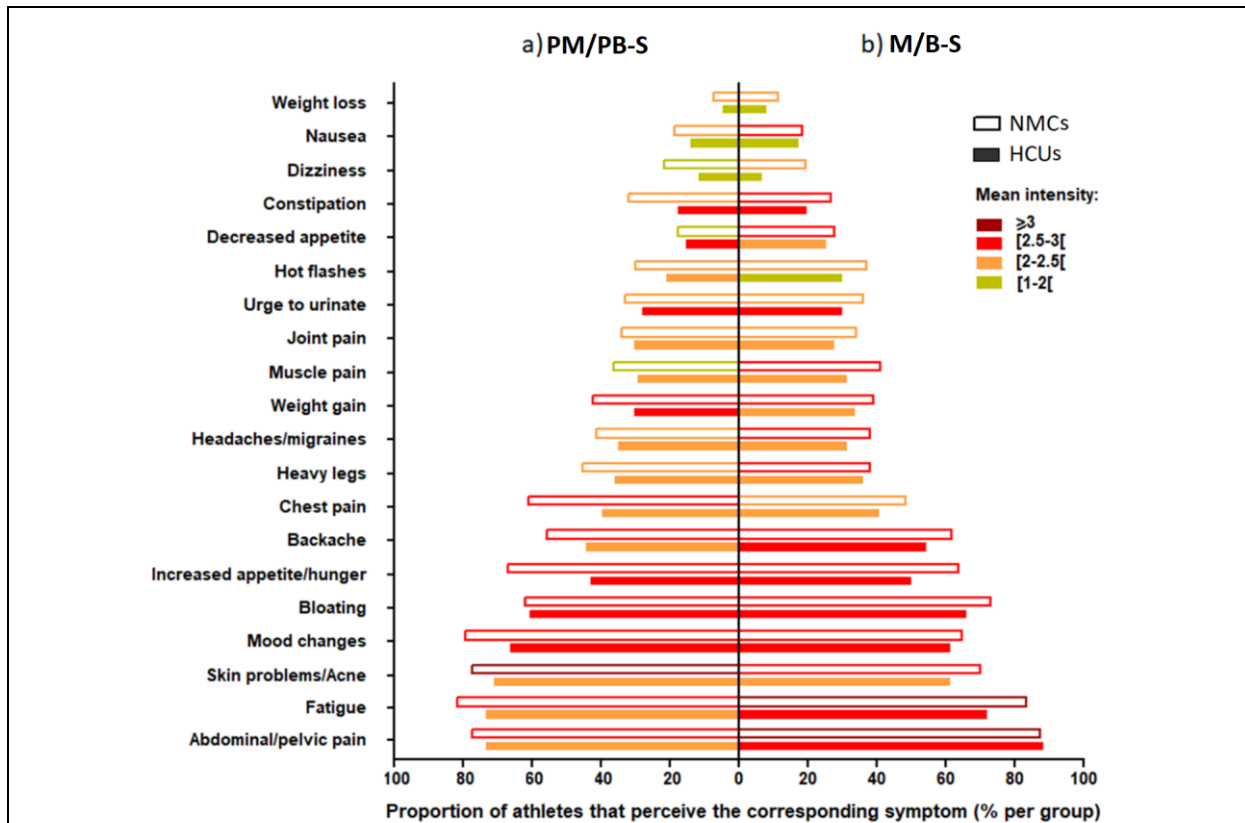


Figure 2. Comparison between the use of hormonal contraceptive, premenstrual/prebleeding syndrome, and menstrual/bleeding symptoms scores with relevant ovarian hormone status and sport practice outcomes.

n = 183 (questions not applicable for n = 2: primary amenorrhea females).

For PM/PB-S and M/B-S scores, data are presented as boxplots: the central line is the median, the edges of the box are the 25th and 75th percentiles, the upper adjacent value is the furthest observation which is within one and a half interquartile range of the upper end of the box, the lower adjacent value is the furthest observation which is within one and a half interquartile range of the lower end of the box. p-values correspond to the global effect between each category in abscissa (significant difference for $p < 0.05$). HCU: hormonal contraceptive use; M/B-S: menstrual/bleeding symptoms; NMC: natural menstrual cycle; PM/PB-S: premenstrual/prebleeding symptoms.

As shown in **Figure 3**, the PM/PB-S and M/B-S scores were significantly associated with a perceived impact on sports practice and performance ($p < 0.001$). Regardless of OHS, most of the athletes reported that they only partially managed or were unable to mitigate PM/PB-S (HCUs: 69.8%, NMCs: 74.2%) and/or M/B-S (HCUs: 76.7%, NMCs: 81.4%). Among females who currently used or previously used OC, 37.4% declared that they had already skipped the inactive pill phase in order to limit the inconveniences associated with the withdraw bleed (*e.g.*, discomfort during practice, pain, fatigue, mood change). Three OC athletes used a continuously hormonal active OC, and had therefore answered “I am not concerned” or “0” to the questions relative to PM/PB-S or M/B-S. There was no

significant difference in the perceived impact of the OHS on sports practice and perceived performance between HCUs and NMCs ($p = 0.57$ and $p = 0.32$, respectively).

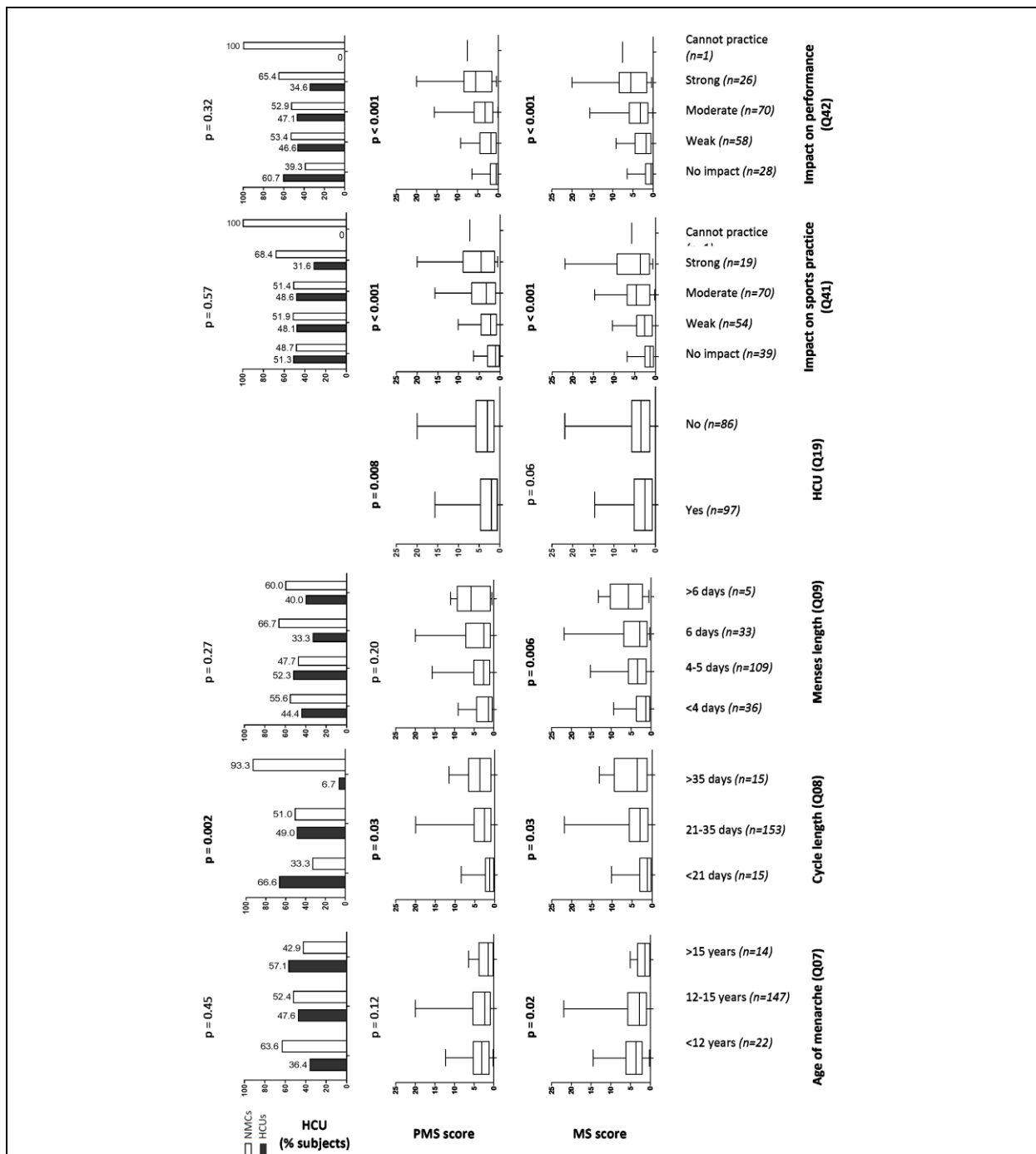


Figure 3. Proportion of athletes perceiving each symptom per group (HCUs/NMCs) and associated average perceived intensity (rated from 1 to 5) during both a) premenstrual/prebleeding, and b) menstrual/bleeding periods.

The percentage is the proportion of athletes who perceived the corresponding symptom. The color represents the average intensity perceived by all females with the corresponding symptom. HCU: hormonal contraceptive use; M/B-S: menstrual/bleeding symptoms; NMCs: natural menstrual cycle; PM/PB-S: premenstrual/prebleeding symptoms.

3.2.4. Self-reported characteristics of BW variations, OHS, and the type of sport

As shown in **Table S3**, 77.3% of the athletes had experienced BW variations. This was unintentional for 22.7% (health problems, increased physical activity at the peak of the sports season), intentional for 43.8% (compliance with a weight category, for aesthetic or health reasons), and both intentional and unintentional for 10.8%. An interruption of menses (more than three months) and menses regularity over the last three years were significantly different relative to BW variations ($p = 0.006$ and $p = 0.01$, respectively). The nature of BW variations was also different as a function of the type of sport ($p < 0.001$). Among athletes practicing BW variations, 92.3% (24/26) of combat sport athletes and 71.4% (10/14) of strength athletes made intentional BW variations, 71.4% (5/7) of aesthetic athletes did unintentionally BW variations. The reasons for BW variations in team and endurance athletes were more heterogeneous. There was no significant association between HCU, type of sport, and nature of BW variations, and the difference between the current and “ideal” BW.

The characteristics of weight loss and weight gain were depending on the type of sport (**Table S4**): weight loss and weight gain duration ($p < 0.001$), the maximal amount of weight loss ($p = 0.04$), and projections on the future amount of weight loss and weight gain ($p = 0.002$) were significantly different as a function of the type of sport. More than half (51.4%) of the included athletes planned to achieve future BW variations through the following methods: diet rebalancing (quality of food, macronutrients repartition) (83.3%), increased physical activity (66.7%), caloric restriction (51.2%), training in heavy clothing (8.3%), fluid restriction (6.0%), vomiting (3.6%), saunas (2.4%), diuretics (2.4%), and/or laxatives (1.2%). Conversely, 16.2% stopped BW variations primarily for the following reasons: physical health (36.7%), mental health and well-being (26.7%), and/or absence or cessation of competition (16.7%).

4. DISCUSSION

Females experience specific ovarian hormone profiles throughout their lifespan and many of which may be associated with perceived negative symptoms and side-effects. Moreover, female athletes may be engaged in BW management for personal (*e.g.*, health, eating disorder, body perception, *etc.*) or performance reasons (*e.g.*, aesthetic, weight category, weight-to-power ratio, *etc.*). However, despite undeniable research progress in taking into consideration females’ hormonal specificities, there is still a lack of understanding and discussion on this topic, and the interaction with BW management, and the world of sport is no exception [9,20,21]. Thus, it is not always easy for female athletes to talk about their BW management or OHS and associated feelings, leading to normalization and trivialization of the pain or discomfort experienced. In this context, to our knowledge, the Answ’Her self-reported

questionnaire is the first field-based tool to propose a subjective evaluation and monitoring of female athletes including information on their OHS, sports practice, and BW variations.

4.1. Answ'Her questionnaire development and reproducibility assessment

Our outcomes suggest the Answ'Her questionnaire is a reproducible tool with good to excellent agreement; with 92% of Lin's coefficient obtained being above 0.7 (T1-T2: 88%, T2-T3: 96%, T1-T3: 92%), and 100% of weighted agreement above 70%. A poor weighted Kappa (0.00-0.40) was observed for 4 questions which can be explained by the nature of these questions based on the feelings of the participants (*i.e.*, questions on the perception score of PM/B-S abdominal pain and fatigue, and perception score of M/HC-S abdominal pain and skin problems). Moreover, as athletes answered to the Answ'Her questionnaire in one-week interval, some of them might have experienced other symptoms due to the menstrual cycle/hormonal contraceptive use progression, which might have subsequently impacted their answers (*e.g.*, ovulation vs early mid-follicular phase). Questions about the reasons of BW variations were all except one reproducible (*i.e.*, "Intentional BW variations for aesthetic reasons"), which may be explained by the low number of aesthetic sports athletes who participated to the study ($n = 14$), and the unsure perception of body image that athletes may have which seems to vary from one week to another.

Moreover, the PM/PB-S and M/B-S scores obtained as part of the questionnaire were also reproducible (ICC: 0.637 and 0.723, respectively). These PM/PB-S and M/B-S scores were developed to better characterize and consider perceived symptoms during the menstrual cycle or as a result of hormonal contraceptive use. Both the amount and the importance of symptoms were considered and the present results showed that higher scores were associated with a perceived difficulty to practice and to perform. In addition, females with mild symptoms perceived less difficulties in practicing than females with severe symptoms. Thus, from a practical perspective, regular monitoring *via* the self-reported questionnaire could help determining the female athletes' symptoms and thus manage their training load during sport-season.

4.2. Perceived ovarian hormone status, PM/PB-S and M/B-S, sports practice, and performance

The present study highlights a homogeneous HCU / NMCs distribution (46.5% of female athletes using HC), in accordance with previous works in females [22,23]. However, the prevalence of HC use among athletes seems to vary from one study to another, as illustrated by the survey conducted by Ekenros *et al.* [24] which included 63% HCUs or Pinel *et al.* [25] with only 26% HCUs. These findings may be a function of the sports considered and/or the level of sport practice in these studies. In sports, the use of HC by females is often justified by a desire to limit the inconvenience of menstruation and menstrual

symptoms [26]. However, there was no significant difference between HCU and NMCs regarding the perception of the impact of PM/PB-S or M/B-S on sports practice and perceived performance. This lack of significance is supported by other researchers [26] and PM/PB-S is estimated to affect 95% of all females of reproductive age [27].

In line with these previously mentioned studies, the most frequent physical and psychological symptoms perceived in the present study (considering both PM/PB-S and M/B-S) were abdominal pain (81.8%), fatigue (77.9%), skin problems (70.2%), mood changes (68.3%), and bloating (65.6%). In particular, 72.1% of participants said they were unable to completely relieve their pain (27.9% “not at all” and 44.3% “partially”). Previous studies have showed a negative impact such symptoms on perceived sport practice and performance in athletes (*e.g.*, 51.1% of elite runners and rowers [28] and 93% of elite rugby athletes) [29]. Specifically, 78% of respondents from the study of Ekenros *et al.* [24] revealed that they perceived an impact of PM-S on their aerobic fitness, muscle strength, mental sharpness, or sleep quality. Similarly, our results suggest that most athletes perceive an impact of OHS on sports practice (78.7%) and performance (84.7%); *i.e.*, positively correlating with the PM/PB-S and M/B-S scores. However, it seems that few athletes considered their cycle specificities and related-hormonal variations when training or planning training [25,26,30]. Considering and integrating these individual physiological and psychological specificities associated with ovarian hormone fluctuations into female athletes’ practice could contribute to optimizing performance.

4.3. Self-reported body weight variation, ovarian hormone status, and type of sport

The majority (54.7%) of the athletes who responded to the Answ'Her questionnaire were concerned by voluntary weight changes. The methods of future voluntary weight loss mentioned by the respondents were heterogeneous: diet rebalancing (55.6%), increased physical activity (45.1%), calorie restriction (31.9%), working out in heavy clothing (4.2%), fluid restriction (3.5%), saunas (2%), and use of laxatives or diuretics (1.4%). These results are in accordance with previous studies specifically looking at voluntary weight changes in athletes, particularly in sports with weight classes (*i.e.*, strength and combat sports) [3,4,31,32] that are more likely to engage athletes in voluntary weight changes during the season. Whatever the reasons, weight concerns may lead athletes to engage in caloric restriction and/or increased physical activity practice to achieve weight goals, with harmful consequences in extreme situations such as RED-s [33,34] highlighting the need for nutritional education [35,36]. In the present study, female athletes who made intentional weight changes were significantly more likely to have disturbed NMC (*e.g.*, more frequent interruption of menstruation for more than three months, less regular menstruations during the last three years). The specific association between weight loss and NMC disturbances may be related to a reduced or, in extreme

situations, low energy availability experienced by athletes [37,38], although other reasons for these disturbances should also be considered and investigated. While for some athletes it may be difficult to meet daily requirement due to the high training load (*e.g.*, high practice of aesthetic or endurance sports), it is still commonly believed that maintaining a low BW is a major determinant of performance in these types of sports. This may be reflected by the lower body mass index for endurance sport athletes in this study compared to other (**Table S2**) [37,39]. In the present study, 50.0% of NMC athletes frequently reported irregular menses (aesthetic: 75%, endurance: 42.9%), and 47.4% (aesthetic: 25%, endurance: 53.3%) had experienced an interruption of their menstruations for 3 months or more (excluding pregnancy). This reinforces the need to evaluate and monitor BW variations and OHS, in relation to energy intake, in female athletes.

However, our study also highlights that weight management and its association with OHS disorders might not just affect endurance, or aesthetic sports, but also team sports. Indeed, in the present study, the latter represent 30.7% of the athletes performing intentional weight variations (**Table S3**), 31% of them declared to be currently losing weight, and 56% plan to lose weight in the future (**Table S4**). Moreover, 21.1% of NMC team sport athletes self-reported having experienced an interruption of their menstruations for three months or more (excluding pregnancy), and 18.9% reported frequent irregular cycle.

4.4. Limitations

The willingness to develop a questionnaire suitable for each athlete led us to personalize and consider many individual variables. As such the length of the Answ'Her questionnaire may also be an obstacle to its use. Most females in our study completed it within 10 min, which seems acceptable for a field-based tool. As with all questionnaire studies, there is response bias. To limit this bias, athletes were asked to answer the questionnaire multiple times to test for its reproducibility, which regrettably also led to a significant reduction in the number of participants. We also wanted to take into consideration the pregnancy and maternity periods, since these OHS are hardly considered (*N.B.*, many athletes still believe that once they become mother, their career will be ended, but more and more athletes are speaking out and proving that returning to a good or even higher level of competition is still possible) [40,41]. Unfortunately, few pregnant and/or athlete mothers (6%) answered the questionnaire, and it was thus not possible to perform relevant statistics on these specific OHS. Similarly, comparisons between sport groups may be taken with caution because of the inequality of the number of participants in each sport (*e.g.*, $n = 39$ endurance vs. $n = 14$ aesthetic). Moreover, participants who voluntarily answered the questionnaire might be the most affected by OHS-associated symptoms and/or BW variations and thus the most sensible to respond to the questionnaire. This may have led

to a bias in the descriptive cross-sectional analyses (*e.g.*, more symptoms, discomfort, frequent body weight variations). Another limitation concerns the definition of BW variation, which was not specified in the questionnaire. Generally, a variation of at least 3% of BW may be considered [42]. However, as the aim is to process the data from this questionnaire on an individual basis, coaches can verify information relating to weight, amount of weight lost/re-gained, and duration of weight loss/re-gain from the questionnaire responses. The Answ'Her questionnaire was developed in French and its reproducibility has been thus validated for French-native speakers. We suggest that culturally adapted translated version of the questionnaire in other languages for athletes from other countries is developed and its reproducibility tested, in order to enlarge the application of the questionnaire. Finally, although these types of questionnaires are useful field-based tools for coaches and athletes, the self-reported and perceived nature of the questions within the Answ'Her questionnaire is a limitation that needs to be highlighted.

5. CONCLUSION

The Answ'Her questionnaire is to our knowledge the first reproducible, self-reported field-based tool to assess ovarian hormone status, sports practice, and body weight variations among female athletes. It could be used for a unique and simple overview of the athlete situation (*e.g.*, at the beginning of a sport season) but also in a longitudinal design to assess the athlete's evolution and/or effectiveness of implanted strategies (*e.g.*, at the beginning of a sport season and after a high load training; training planning according to the perceived OHS-associated symptoms, *etc.*). In addition, before implementing strategies, it would be essential to complete the subjective collected data by objective measurements (*e.g.*, ovarian hormone blood tests, regular weighing, *etc.*).

Authors' contribution: Identification of the problematic: MD, LI, DT; Conception the questionnaire: SB, ECB, MD, AH, LI, LP, DT; Diffusion of the questionnaire: SB; Statistical analysis: CL, BP; Redaction of the manuscript: SB; Reviewing: ECB, MD, KES, AH, LI, DT. All authors read and approved the final version of the manuscript.

REFERENCES

- [1] Khodae M, Olewinski L, Shadgan B, Kiningham RR. Rapid Weight Loss in Sports with Weight Classes. *Curr Sports Med Rep* 2015;14:435–41. <https://doi.org/10.1249/JSR.000000000000206>.
- [2] Midorikawa T, Tanaka S, Ando T, Konishi M, Ohta M, Torii S, et al. The Relationship between Changes in Organ-Tissue Mass and Sleeping Energy Expenditure Following Weight Change in College Sumo Wrestlers. *Medicina (Kaunas)* 2020;56:E536. <https://doi.org/10.3390/medicina56100536>.
- [3] Morehen JC, Langan-Evans C, Hall ECR, Close GL, Morton JP. A 5-Year Analysis of Weight Cycling Practices in a Male World Champion Professional Boxer: Potential Implications for Obesity and Cardiometabolic Disease. *International Journal of Sport Nutrition & Exercise Metabolism* 2021;31:507–13.
- [4] Figlioli F, Bianco A, Thomas E, Stajer V, Korovljev D, Trivic T, et al. Rapid Weight Loss Habits before a Competition in Sambo Athletes. *Nutrients* 2021;13. <https://doi.org/10.3390/nu13041063>.
- [5] Kasper AM, Crighton B, Langan-Evans C, Riley P, Sharma A, Close GL, et al. Case Study: Extreme Weight Making Causes Relative Energy Deficiency, Dehydration, and Acute Kidney Injury in a Male Mixed Martial Arts Athlete. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 2019;29:331–8. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2018-0029>.
- [6] Miles-Chan JL, Isacco L. Weight cycling practices in sport: A risk factor for later obesity? *Obes Rev* 2021;22 Suppl 2:e13188. <https://doi.org/10.1111/obr.13188>.
- [7] Degoutte F, Jouanel P, Bègue RJ, Colombier M, Lac G, Pequignot JM, et al. Food Restriction, Performance, Biochemical, Psychological, and Endocrine Changes in Judo Athletes. *Int J Sports Med* 2005;9–18. <https://doi.org/10.1055/s-2005-837505>.
- [8] Tsai M-L, Chou K-M, Chang C-K, Fang S-H. Changes of mucosal immunity and antioxidation activity in elite male Taiwanese taekwondo athletes associated with intensive training and rapid weight loss. *British Journal of Sports Medicine* 2011;45:729–34. <https://doi.org/10.1136/bjism.2009.062497>.
- [9] Bagot S, Pélissier L, Pereira B, Chanséaume Bussiere E, Duclos M, Dulloo A, et al. Weight regain, body composition, and metabolic responses to weight loss in weight cycling athletes: A systematic review and meta-analyses. *Obes Rev* 2023:e13658. <https://doi.org/10.1111/obr.13658>.
- [10] Costello JT, Bieuzen F, Bleakley CM. Where are all the female participants in Sports and Exercise Medicine research? *Eur J Sport Sci* 2014;14:847–51. <https://doi.org/10.1080/17461391.2014.911354>.
- [11] Elliott-Sale KJ, Minahan CL, de Jonge XAKJ, Ackerman KE, Sipilä S, Constantini NW, et al. Methodological Considerations for Studies in Sport and Exercise Science with Women as Participants: A Working Guide for Standards of Practice for Research on Women. *Sports Med* 2021;51:843–61. <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01435-8>.
- [12] McNulty KL, Elliott-Sale KJ, Dolan E, Swinton PA, Ansdell P, Goodall S, et al. The Effects of Menstrual Cycle Phase on Exercise Performance in Eumenorrhic Women: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med* 2020;50:1813–27. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01319-3>.
- [13] Boisseau N, Isacco L. Substrate metabolism during exercise: sexual dimorphism and women’s specificities. *Eur J Sport Sci* 2021;1–21. <https://doi.org/10.1080/17461391.2021.1943713>.
- [14] Matsuda T, Takahashi H, Nakamura M, Kanno M, Ogata H, Ishikawa A, et al. Influence of menstrual cycle on muscle glycogen utilization during high-intensity intermittent exercise until exhaustion in healthy women. *Appl Physiol Nutr Metab* 2022;47:671–80. <https://doi.org/10.1139/apnm-2021-0532>.

- [15] Rael B, Romero-Parra N, Alfaro-Magallanes VM, Barba-Moreno L, Cupeiro R, Janse de Jonge X, et al. Body Composition Over the Menstrual and Oral Contraceptive Cycle in Trained Females. *Int J Sports Physiol Perform* 2021;16:375–81. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2020-0038>.
- [16] Koşar ŞN, Güzel Y, Köse MG, Kin İşler A, Hazır T. Whole and segmental body composition changes during mid-follicular and mid-luteal phases of the menstrual cycle in recreationally active young women. *Ann Hum Biol* 2022;49:124–32. <https://doi.org/10.1080/03014460.2022.2088857>.
- [17] Thompson BM, Hillebrandt HL, Sculley DV, Barba-Moreno L, Janse de Jonge XAK. The acute effect of the menstrual cycle and oral contraceptive cycle on measures of body composition. *Eur J Appl Physiol* 2021;121:3051–9. <https://doi.org/10.1007/s00421-021-04771-9>.
- [18] Mokkink LB, Terwee CB, Patrick DL, Alonso J, Stratford PW, Knol DL, et al. The COSMIN checklist for assessing the methodological quality of studies on measurement properties of health status measurement instruments: an international Delphi study. *Qual Life Res* 2010;19:539–49. <https://doi.org/10.1007/s11136-010-9606-8>.
- [19] Terwee CB, Bot SDM, de Boer MR, van der Windt DAWM, Knol DL, Dekker J, et al. Quality criteria were proposed for measurement properties of health status questionnaires. *J Clin Epidemiol* 2007;60:34–42. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2006.03.012>.
- [20] Verhoef SJ, Wielink MC, Achterberg EA, Bongers MY, Goossens SMTA. Absence of menstruation in female athletes: why they do not seek help. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation* 2021;13:146. <https://doi.org/10.1186/s13102-021-00372-3>.
- [21] Hantsoo L, Rangaswamy S, Voegtline K, Salimgaraev R, Zhaunova L, Payne JL. Premenstrual symptoms across the lifespan in an international sample: data from a mobile application. *Arch Womens Ment Health* 2022;25:903–10. <https://doi.org/10.1007/s00737-022-01261-5>.
- [22] Martin D, Sale C, Cooper SB, Elliott-Sale KJ. Period Prevalence and Perceived Side Effects of Hormonal Contraceptive Use and the Menstrual Cycle in Elite Athletes. *Int J Sports Physiol Perform* 2018;13:926–32. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0330>.
- [23] Larsen B, Morris K, Quinn K, Osborne M, Minahan C. Practice does not make perfect: A brief view of athletes' knowledge on the menstrual cycle and oral contraceptives. *Journal of Science and Medicine in Sport* 2020;23:690–4. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2020.02.003>.
- [24] Ekenros L, von Rosen P, Solli GS, Sandbakk Ø, Holmberg H-C, Hirschberg AL, et al. Perceived impact of the menstrual cycle and hormonal contraceptives on physical exercise and performance in 1,086 athletes from 57 sports. *Frontiers in Physiology* 2022;13.
- [25] Pinel CJJ, Mehta R, Okholm Kryger K. The impact and experienced barriers menstruation present to football participation in amateur female footballers. *Journal of Sports Sciences* 2022;40:1950–63. <https://doi.org/doi.org/10.1080/02640414.2022.2122328>.
- [26] Brown N, Knight CJ. Understanding female coaches' and practitioners' experience and support provision in relation to the menstrual cycle. *International Journal of Sports Science & Coaching* 2022;17:235–43. <https://doi.org/10.1177/17479541211058579>.
- [27] Kwan I, Onwude JL. Premenstrual syndrome. *BMJ Clin Evid* 2015;2015:0806.
- [28] Bruinvels G, Burden RJ, McGregor AJ, Ackerman KE, Dooley M, Richards T, et al. Sport, exercise and the menstrual cycle: where is the research? *Br J Sports Med* 2017;51:487–8. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096279>.
- [29] Findlay RJ, Macrae EHR, Whyte IY, Easton C, Whyte) LJF (née. How the menstrual cycle and menstruation affect sporting performance: experiences and perceptions of elite female rugby players. *Br J Sports Med* 2020;54:1108–13. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2019-101486>.
- [30] Righi I, Barroso R. Do Recreationally-Trained Women of Different Ages Perceive Symptoms of the Menstrual Cycle and Adjust Their Training According to Phases? *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2022;19:13841. <https://doi.org/10.3390/ijerph192113841>.

- [31] Sagayama H, Kondo E, Tanabe Y, Ohnishi T, Yamada Y, Takahashi H. Bone mineral density in male weight-classified athletes is higher than that in male endurance-athletes and non-athletes. *Clin Nutr ESPEN* 2020;36:106–10. <https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2020.01.008>.
- [32] Amatori S, Barley OR, Gobbi E, Vergoni D, Carraro A, Baldari C, et al. Factors Influencing Weight Loss Practices in Italian Boxers: A Cluster Analysis. *Int J Environ Res Public Health* 2020;17. <https://doi.org/10.3390/ijerph17238727>.
- [33] Sarin HV, Gudelj I, Honkanen J, Ihalainen JK, Vuorela A, Lee JH, et al. Molecular Pathways Mediating Immunosuppression in Response to Prolonged Intensive Physical Training, Low-Energy Availability, and Intensive Weight Loss. *Front Immunol* 2019;10:907. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.00907>.
- [34] Melin AK, Heikura IA, Tenforde A, Mountjoy M. Energy Availability in Athletics: Health, Performance, and Physique. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 2019;29:152–64. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2018-0201>.
- [35] Desbrow B, Burd NA, Tarnopolsky M, Moore DR, Elliott-Sale KJ. Nutrition for Special Populations: Young, Female, and Masters Athletes. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 2019;29:220–7. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2018-0269>.
- [36] Areta JL, Elliott-Sale KJ. Nutrition for female athletes: What we know, what we don't know, and why. *European Journal of Sport Science* 2022;22:669–71. <https://doi.org/10.1080/17461391.2022.2046176>.
- [37] Mountjoy M, Sundgot-Borgen J, Burke L, Carter S, Constantini N, Lebrun C, et al. The IOC consensus statement: beyond the Female Athlete Triad—Relative Energy Deficiency in Sport (RED-S). *Br J Sports Med* 2014;48:491–7. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2014-093502>.
- [38] Önnik L, Mooses M, Suvi S, Haile DW, Ojiambo R, Lane AR, et al. Prevalence of Triad–RED–S symptoms in high-level Kenyan male and female distance runners and corresponding control groups. *Eur J Appl Physiol* 2022;122:199–208. <https://doi.org/10.1007/s00421-021-04827-w>.
- [39] Sundgot-Borgen J, Garthe I. Elite athletes in aesthetic and Olympic weight-class sports and the challenge of body weight and body compositions. *J Sports Sci* 2011;29 Suppl 1:S101-114. <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.565783>.
- [40] INSEP LE MAG n°51 - SEPTEMBRE/OCTOBRE 2022. CalameoCom n.d. <https://www.calameo.com/read/003232740a4141a62bbd4> (accessed November 25, 2022).
- [41] Forstmann N, Meignié A, De Larochelambert Q, Duncombe S, Schaal K, Maître C, et al. Does maternity during sports career jeopardize future athletic success in elite marathon runners? *Eur J Sport Sci* 2022:1–8. <https://doi.org/10.1080/17461391.2022.2089054>.
- [42] Brechney GC, Cannon J, Goodman SP. Effects of Weight Cutting on Exercise Performance in Combat Athletes: A Meta-Analysis. *Int J Sports Physiol Perform* 2022;17:995–1010. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2021-0104>.

SUPPLEMENTARY TABLES

Table S1. Intraclass correlation coefficient per key question of interest for N = {2,3} responses per question per subject.

Questionnaire division	Questions subjects (n° question)	N total responses	N subjects	ICC [95%CI]	Reproducibility
II - OHS and contraceptive use	Age of menarche (Q07)	235	85	0.91 [0.87; 0.94]	+++
	Ovarian hormonal cycle length (Q08)	235	85	0.83 [0.76; 0.88]	++
	Menses length (Q09)	235	85	0.87 [0.82; 0.91]	++
	3-month menses interruption (Q11)	235	85	0.90 [0.85; 0.93]	++
	Last 6 months menses regularity (Q12)	235	85	0.58 [0.46; 0.69]	+
	Last 3 years menses regularity (Q13)	235	85	0.71 [0.62; 0.79]	++
	Past and present contraception use or not (Q18)	235	85	0.99 [0.99; 1.00]	+++
	Type of contraception use (Q19)	111	41	0.62 [0.53; 0.70]	+
	Contraception use length (Q21)	111	41	0.96 [0.93; 0.97]	+++
	Miss of OC intake (Q22)	95	35	0.89 [0.82; 0.94]	++
	Miss the intake of the non-active OC period intake (Q26)	111	41	0.92 [0.87; 0.95]	+++
	Miss of OC intake in the previous contraception (Q31)	48	17	0.92 [0.83; 0.97]	+++
III - OHS and associated symptoms	SCORE PM/PB-S	235	85	0.64 [0.53; 0.74]	+
	PM/PB-S relief (Q35)	235	85	0.67 [0.56; 0.76]	+
	SCORE M/B-S	235	85	0.71 [0.61; 0.79]	++
	M/B-S relief (Q39)	235	85	0.71 [0.61; 0.79]	++
IV - OHS and sport practice	Perceived OHS impact on sports practice (Q41)	235	85	0.72 [0.62; 0.80]	++
	Perceived OHS impact on performance (Q42)	235	85	0.77 [0.69; 0.84]	++
	Type of OHS impact on performance (Q43)	187	68	0.51 [0.37; 0.65]	+
	Perceived impact of COVID-19 vaccine on OHS (Q44)	235	85	0.88 [0.83; 0.92]	++
V - Sports practice description	Starting age of sports practice (Q47)	238	86	0.99 [0.99; 0.99]	+++
	Number of sessions (/week) (Q48)	238	86	0.89 [0.85; 0.92]	++
	Mean sessions length (h) (Q49)	238	86	0.61 [0.49; 0.71]	+
	Higher level in competition (Q50)	238	86	0.88 [0.83; 0.92]	++
VI - BW management	Past, current, and future weight variations (Q53)	238	86	0.77 [0.69; 0.84]	++
	Intentional BW variations for health reasons (Q54a)	238	86	0.80 [0.73; 0.86]	++
	Intentional BW variations for aesthetic reasons (Q54b)	238	86	0.27 [0.15; 0.43]	
	Intentional BW variations for performance reasons (Q54c)	238	86	0.55 [0.43; 0.66]	+
	Intentional BW variations to respect weight category (Q54d)	238	86	0.97 [0.96; 0.98]	+++
	Non-intentional BW variations due to the increase of physical activity (Q54e)	238	86	0.66 [0.56; 0.75]	+
	Non-intentional BW variations for other reasons (Q54f)	238	86	0.78 [0.70; 0.84]	++
	I am not concerned by BW variations (Q54g)	238	86	0.51 [0.39; 0.64]	+
Other reasons (Q54h)	238	86	0.53 [0.41; 0.65]	+	
VII - BW variations	Starting age of BW variations (Q55)	152	58	0.78 [0.68; 0.86]	++
	Ending age of BW variations (if applicable) (Q56)	29	12	0.87 [0.68; 0.95]	++
	Mean amount of weight loss (kg) (Q58)	152	58	0.84 [0.76; 0.90]	++
	Mean amount of weight gain (kg) (Q60)	152	58	0.85 [0.77; 0.90]	++
	Weight gain duration (Q61)	132	50	0.95 [0.92; 0.97]	+++
	Maximal weight loss (Q63)	152	58	0.89 [0.83; 0.93]	++

+: $0.4 \leq \text{ICC} < 0.7$, ++: $0.7 \leq \text{ICC} < 0.9$, +++: $\text{ICC} \geq 0.9$. BW: body weight; CI: confidence interval; ICC: intraclass correlation coefficient; M/B-S: menstrual/bleeding symptoms; OC: oral contraceptive; OHS: ovarian hormone status; PM/PB-S: premenstrual/prebleeding symptoms.

Table S2. Main type of sports practiced and repartition of hormonal contraceptive use.

Group	Total	n		BMI (kg/m ²)			Age (years)			Years of sports practice			Hours of sports practice per week		
		NMC	HCU	Total	NMC	HCU	Total	NMC	HCU	Total	NMC	HCU	Total	NMC	HCU
Team	70	40	30	24.0 ± 3.9^b	24.2 ± 3.9	23.8 ± 4.0	22.2 ± 4.5^d	23.1 ± 5.3	21.1 ± 2.7	10.4 ± 5.8^{cdef}	10.5 ± 6.4	10.2 ± 5.0	7.4 ± 2.5	7.4 ± 2.6	7.5 ± 2.4
<i>Rugby</i>	33	21	12												
<i>Football</i>	18	12	6												
<i>Basketball</i>	8	3	5												
<i>Handball</i>	7	1	6												
<i>Volleyball</i>	4	3	1												
Endurance	39	17	22	20.8 ± 2.0^{acd}	20.6 ± 2.0	20.9 ± 2.0	24.3 ± 6.1	26.6 ± 7.2	22.5 ± 4.4	8.8 ± 6.9^{cef}	8.9 ± 6.6	8.8 ± 7.4	7.5 ± 4.1	7.0 ± 2.3	7.9 ± 5.1
<i>Athletics</i>	9	2	7												
<i>Running/trail</i>	9	6	3												
<i>Triathlon</i>	9	5	4												
<i>Swimming</i>	8	3	5												
<i>Cycling/BTM</i>	4	1	3												
Combat	27	18	9	23.9 ± 3.2^b	24.1 ± 3.1	22.4 ± 2.1	22.2 ± 4.0	22.0 ± 4.3	22.6 ± 3.6	14.3 ± 5.3^{bd}	13.9 ± 6.0	15.0 ± 3.6	7.9 ± 3.5	7.5 ± 2.8	8.6 ± 4.7
<i>Judo</i>	24	16	8												
<i>Boxing</i>	3	2	1												
Strength	18	12	6	23.5 ± 2.9^b	24.2 ± 3.8	23.2 ± 1.4	25.4 ± 4.1^{ae}	25.1 ± 3.9	26.2 ± 4.8	6.3 ± 4.9^{acef}	5.2 ± 4.4	8.5 ± 5.5	7.1 ± 2.5	7.3 ± 2.6	6.9 ± 2.5
<i>CrossFit</i>	5	3	2												
<i>Fitness</i>	5	3	2												
<i>Weightlifting</i>	3	2	1												
<i>Weight training</i>	3	2	1												
<i>Powerlifting</i>	2	2	0												
Aesthetic	14	4	10	22.0 ± 2.4	20.7 ± 0.8	22.6 ± 2.6	21.1 ± 4.8^d	20.0 ± 2.0	21.5 ± 2.3	14.9 ± 6.4^{abd}	13.5 ± 4.5	15.5 ± 2.4	7.2 ± 4.8	7.5 ± 3.4	7.1 ± 4.0
<i>Gymnastic</i>	11	3	8												
<i>Dance</i>	2	0	2												
<i>Ice-skating</i>	1	1	0												
Other	17	8	9	23.0 ± 2.9	24.1 ± 3.1	22.4 ± 2.1	23.5 ± 4.6	24.0 ± 5.3	23.0 ± 4.1	16.1 ± 6.1^d	17.5 ± 6.1	14.8 ± 6.2	6.6 ± 3.6	5.4 ± 1.2	7.7 ± 4.7
<i>Equitation</i>	9	5	4												
<i>Badminton</i>	3	1	2												
<i>Tennis</i>	2	1	1												
<i>Motocross</i>	1	0	1												
<i>Roller-skating</i>	1	0	1												
<i>Table tennis</i>	1	1	0												
Total	185	99	86	23.0 ± 3.4	23.3 ± 3.6	22.6 ± 3.1	23.0 ± 4.8	23.7 ± 5.5	22.2 ± 3.7	11.1 ± 6.4	10.9 ± 6.7	11.3 ± 6.0	7.4 ± 3.2	7.2 ± 2.5	7.7 ± 3.8

Significant difference (p-value < 0.05) with: a: Team; b: Endurance; c: Combat; d: Strength; e: Aesthetic; and f: Other sports. AM: amenorrhea; BMI: body mass index; HCU: hormonal contraceptive use; NMC: natural menstrual cycle; SD: standard deviation.

Table S3. Comparison between (A) the nature of body weight variations, and (B) the current *minus* ideal body weight with relevant ovarian hormone status, sports practice, and body weight management outcomes.

(A)	Nature of BW variations (Q54)				p-value
	Not concerned (n = 42)	Non-intentional only (n = 42)	Intentional only (n = 81)	Both (n = 20)	
Interruption of menses > 3 months (Q11)					0.006
Yes	8 (19.0%)	9 (22.0%)	27 (33.8%)	12 (60.0%)	
No	34 (81.0%)	32 (78.0%)	53 (66.2%)	8 (40.0%)	
Menses regularity last 6 months (Q12)					0.14
Yes	30 (71.4%)	32 (78.0%)	47 (58.8%)	9 (45.0%)	
No	9 (21.4%)	8 (19.5%)	27 (33.8%)	9 (45.0%)	
Other	3 (7.1%)	1 (2.4%)	6 (7.5%)	2 (10.0%)	
Menses regularity last 3 years (Q13)					0.01
<i>I've not had my period in the past 3 years</i>	0 (0%)	0 (0%)	3 (3.8%)	1 (5.0%)	
Always	2 (4.8%)	1 (2.4%)	6 (7.5%)	6 (30.0%)	
Often	5 (11.9%)	6 (14.6%)	16 (20.0%)	3 (15.0%)	
Sometimes	8 (19.0%)	12 (29.3%)	21 (26.3%)	1 (5.0%)	
Rarely	14 (33.3%)	14 (34.1%)	23 (28.8%)	8 (40.0%)	
Never	13 (31%)	8 (19.5%)	11 (13.8%)	1 (5.0%)	
HCU (Q19)					0.06
No	17 (40.5%)	18 (43.9%)	49 (61.3%)	13 (65.0%)	
Yes	25 (59.5%)	23 (56.1%)	31 (38.7%)	7 (35.0%)	
Type of sport (Q46)					<0.001
Team	17 (40.5%)	22 (52.4%)	23 (28.4%)	8 (40.0%)	
Endurance	9 (21.4%)	8 (19.0%)	13 (16.0%)	9 (45.0%)	
Strength	4 (9.5%)	3 (7.1%)	10 (12.3%)	1 (5.0%)	
Combat	1 (2.4%)	0 (0%)	24 (29.6%)	2 (10.0%)	
Aesthetic	7 (1.7%)	5 (11.9%)	2 (2.5%)	0 (0.0%)	
Other	4 (9.5%)	4 (9.5%)	9 (11.1%)	0 (0.0%)	
Starting age of practice (Q47)	13 [6; 18]	11 [6; 14]	10 [6; 17]	15 [7; 18]	0.58
Number of sport session/week (Q48)	5 [3; 6]	4 [3; 5]	5 [4; 6]	5 [4; 7]	0.07
Sport sessions length (min) (Q49)	100 ± 36	106 ± 34	96 ± 24	93 ± 18	0.51
Competitive level (Q50)					0.13
<i>I have never competed</i>	5 (11.9%)	3 (7.1%)	6 (7.4%)	1 (5.0%)	
Departmental	4 (9.5%)	6 (14.3%)	2 (2.5%)	3 (15.0%)	
Regional	12 (28.6%)	9 (21.4%)	12 (14.8%)	5 (25.0%)	
National	19 (45.2%)	19 (45.2%)	46 (56.8%)	8 (40.0%)	
International	2 (4.8%)	3 (7.1%)	13 (16.0%)	1 (5.0%)	
World	0 (0%)	2 (4.8%)	2 (2.5%)	2 (10.0%)	

Data are presented as the number of female athletes (percentages), mean ± standard deviation, or median [25th; 75th percentiles].

(B)	n	Current BW <i>minus</i> ideal BW	p-value
HCU (Q19)			0.93
No	56	2 [1; 5]	
Yes	48	2 [2; 3]	
Type of sport (Q46)			0.17
Team	35	2 [1; 5]	
Endurance	25	2 [1; 3]	
Strength	7	3 [2; 4]	
Combat	24	2 [0; 4]	
Aesthetic	4	4 [2; 9]	
Other	11	3 [2; 10]	
Nature of BW variation (Q54)			0.36
Not concerned	1	3	
Non-intentional only	28	2 [1; 3]	
Intentional only	59	2 [1; 5]	
Both	18	3 [2; 4]	
Habitual amount of weight loss (Q58)	106	$r = 0.26$	0.008
Habitual amount of weight gain (Q60)	106	$r = 0.19$	0.05

Data are presented as median [25th; 75th percentiles] or Spearman's correlation coefficient (denoted r). BW: body weight; HCU: hormonal contraceptive use.

Table S4. Comparisons between the type of sport with relevant body weight management outcomes among athletes who reported having already made body weight variations, regardless of their nature (intentional and/or non-intentional).

(A)	Type of sport (Q46)						p-value
	Team (n = 35)	Endurance (n = 25)	Strength (n = 7)	Combat (n = 24)	Aesthetic (n = 4)	Other (n = 11)	
Amount of WL (Q58) (kg)	4 [3; 6]	3 [3; 4]	4 [3; 4]	3 [3; 4]	5 [4; 5]	4 [3; 5]	0.68
WL length (Q59)							<0.001
<i>I don't (or didn't) lose weight</i>	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	
≤ 1 week	4 (11.4%)	0 (0%)	2 (28.6%)	10 (41.7%)	0 (0%)	0 (0%)	
≤ 1 month	7 (20.0%)	9 (36.0%)	1 (14.3%)	13 (54.2%)	2 (50.0%)	6 (54.6%)	
≤ 3 months	18 (51.4%)	14 (56.0%)	2 (28.6%)	1 (4.2%)	2 (50.0%)	3 (27.3%)	
≤ 6 months	5 (14.3%)	2 (8.0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	1 (9.1%)	
> 6 months	1 (2.9%)	0 (0%)	2 (28.6%)	0 (0%)	0 (0%)	1 (9.1%)	
Amount of WG (Q60) (kg)	3 [2; 5]	3 [2; 5]	3 [2; 3]	3 [3; 5]	3 [2; 5]	4 [3; 5]	0.36
WG length (Q61) (days)	8.7 [5.0; 13.0]	7.6 [3.0; 10.8]	6.5 [4.3; 8.7]	2.0 [1.0; 3.0]	6.5 [3.2; 10.8]	8.7 [4.3; 32.5]	<0.001
Current BW variation situation (Q62)							0.23
WL	11 (31.4%)	7 (28.0%)	5 (71.4%)	7 (29.2%)	0 (0%)	5 (45.5%)	
Maintenance	20 (57.1%)	15 (60.0%)	1 (14.3%)	13 (54.2%)	4 (100%)	3 (27.3%)	
WG	4 (11.4%)	3 (12.0%)	1 (14.3%)	4 (16.7%)	0 (0%)	3 (27.3%)	
Maximal amount of WL (Q63) (kg)	8 [5; 10]	6 [5; 10]	5 [5; 11]	5 [4; 7]	8 [5; 13]	8 [6; 12]	0.04
Current BW vs. ideal BW (Q64) (kg)	2 [1; 5]	2 [1; 3]	3 [2; 4]	2 [0; 4]	4 [2; 9]	3 [2; 10]	0.17

(B)	Type of sport (Q46)						p-value
	Team (n = 45)	Endurance (n = 27)	Strength (n = 11)	Combat (n = 26)	Aesthetic (n = 5)	Other (n = 12)	
Future intentional WL (Q65)							0.28
No	13 (28.9%)	6 (22.2%)	2 (18.2%)	8 (30.8%)	2 (40.0%)	0 (0%)	
<i>I don't know yet</i>	7 (15.6%)	4 (14.8%)	2 (18.2%)	1 (3.9%)	0 (0%)	0 (0%)	
Yes	25 (55.6%)	17 (63.0%)	7 (63.6%)	17 (65.4%)	3 (60.0%)	12 (100%)	
Future amount of WL (Q66) (kg)	5 [3; 10]	3 [2; 3]	4 [3; 5]	4 [3; 5]	5 [4; 5]	5 [3; 10]	0.002
Future WL length (Q67) (days)	4 [3; 6]	2 [1; 2]	4 [2; 5]	2 [1; 3]	3 [1; 6]	3 [3; 6]	0.002

Data are presented for athletes who had access to the part on body weight variations (parts VI, VII, and VIII of the Answ'Her questionnaire). **Table S4A** concerned athletes who already had or currently have body weight variations (n = 106), and **Table S4B** concerned athletes who already had, currently have or project to have body weight variations (n = 126). Data are presented as the number of female athletes (percentages) or median [25th; 75th percentiles]. BW: body weight; WL: weight loss; WG: weight gain.

SUPPLEMENTARY MATERIALS

Supplementary material 1. Answ'Her Questionnaire Original French version.

Original French version of the Answ'Her questionnaire used and validated in this study.

(Voir Annexe 3 de ce manuscrit de thèse).

Supplementary material 2. Answ'Her Questionnaire English version.

Translated version of the Answ'Her questionnaire, but not validated, for a better understanding for non-French speakers.

(Voir Annexe 4 de ce manuscrit de thèse).

Supplementary material 3. Test-retest-retest results.

Test-retest-retest results per question between each time point for reproducibility validation.

(Voir Annexe 5 de ce manuscrit de thèse).

ÉTUDE 2

Étude du métabolisme à l'exercice chez la femme :
considérations pratiques et défis pour une recherche
de qualité

En révision dans International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism

**FEMALE EXERCISE METABOLISM: QUALITY ASSESSMENT OF EXISTING KNOWLEDGE BASE
AND KEY CHALLENGES IN STUDY DESIGN.**

Running Title: Challenges of the Female Metabolism Study

Sarah BAGOT^{1*}, Jennifer MILES-CHAN², Anthony Carl HACKNEY^{3,4}, Martine DUCLOS^{5,6,7},
Laurie ISACCO¹

1. Clermont Auvergne University, EA 3533, Laboratory of the Metabolic Adaptations to Exercise under Physiological and Pathological Conditions (AME2P), CRNH Auvergne, Clermont-Ferrand, France. sarah.bagot@uca.fr, laurie.isacco@uca.fr.

2. Human Nutrition Unit, School of Biological Sciences, University of Auckland, Auckland, New Zealand. j.miles-chan@auckland.ac.nz.

3. Department of Exercise & Sport Science, University of North Carolina, Chapel Hill, NC 27599, USA. ach@email.unc.edu.

4. Department of Nutrition, Gillings School of Global Public Health, University of North Carolina, Chapel Hill, NC 27599, USA.

5. University Hospital (CHU) Clermont-Ferrand, Hospital G. Montpied, Department of Sport Medicine and Functional Explorations, Clermont-Ferrand, France. mduclos@chu-clermontferrand.fr.

6. Observatoire National de l'Activité Physique et de la Sédentarité (ONAPS), Faculty of Medicine, Clermont Auvergne University, Clermont-Ferrand, France.

7. International Research Chair Health in Motion, Clermont Auvergne University Foundation, Clermont-Ferrand, France.

***Corresponding author:** Sarah BAGOT, Clermont Auvergne University, UPR 3533, Laboratory of the Metabolic Adaptations to Exercise under Physiological and Pathological Conditions (AME2P), CRNH Auvergne, Clermont-Ferrand, France. sarah.bagot@uca.fr.

ABSTRACT

A better understanding of the practical and methodological challenges inherent in accurately tracking female hormonal status would enhance the clarity of research findings in exercise metabolism. Therefore, the objectives of this study were to conduct an objective assessment of the quality of existing literature in this area and to provide a general overview of the practical conditions and issues encountered in studies investigating substrate metabolism during exercise in women, both those using hormonal contraceptives (HC+) and those not using them (HC-). Forty-one articles were identified through systematic reviews, meta-analyses, and searches on PubMed/MEDLINE. A quality assessment framework was developed and applied using a double-blind scoring approach. The loss/exclusion of data between baseline and final analyses per study was quantified, and the main challenges were highlighted. The mean global scores indicate that the quality of studies conducted among HC+ women (80%) tends to be higher than those conducted among HC- women (49%). The mean rate of participant/data loss in HC- studies was 26.7%. A high rate of participant loss does not appear to be systematically associated with a low number of participants included in the final analysis. High-quality research may be easier to achieve in studies involving HC+ participants compared to those involving HC- participants. Studies on HC- women seem to face more practical challenges, such as tracking the menstrual cycle and targeting specific (sub)phases of the menstrual cycle, along with technical and feasibility limitations. Thus, while frameworks for designing such studies exist, this assessment of the available literature suggests that these frameworks may present challenges that are difficult to implement feasibly.

Keywords: women, metabolism, menstrual cycle, hormonal contraceptives, exercise quality research

Key points:

- A concerted effort is needed to enhance the quality of studies investigating the impact of ovarian hormonal status on exercise metabolism, particularly with regard to the effects of menstrual cycling.
- High-quality research appears to be more readily achievable in studies involving participants using hormonal contraceptives compared to those involving naturally menstruating participants.
- Studies involving naturally menstruating women seem to encounter more practical challenges, such as tracking the menstrual cycle and targeting its specific (sub)phases, along with technical and feasibility limitations.

1. INTRODUCTION

According to leading biomedical and life sciences online libraries, female-specific evidence in the context of sport and exercise physiology has substantially increased in recent years (Elliott-Sale et al., 2021). Despite this progress, women and their physiological specificities remain underrepresented in sport and exercise physiology research [2]. Several experts have emphasized the importance of advancing female-specific scientific studies, highlighting the need not only to increase the number of such studies but also to improve their methodological quality. This includes reducing sources of variability, particularly in the consideration, identification, and tracking of participants' hormonal status [1,3–5]. However, while research in female physiology is gaining increasing attention, along with the development of methodological guidelines by the scientific community, little is known or reported about the challenges associated with implementing and adhering to these guidelines. A better understanding of the practical and methodological difficulties inherent in the accurate tracking of female hormonal status would facilitate more accurate interpretation of both current and future research findings.

Importantly, although there is growing interest in female exercise physiology, the studies conducted to date span a wide range of physiological systems (e.g., cardiovascular, respiratory, neuromuscular, hormonal, and metabolic), making it difficult to draw firm conclusions regarding each specific system [4,6,7]. This disparity in the systems studied and the outcomes measured (e.g., maximal oxygen consumption, maximal strength) has been recently highlighted by two systematic reviews and meta-analyses that examined the effects of the menstrual cycle and hormonal contraceptive use on sports performance [6,7]. Both reviews also noted the lack of homogeneity across studies in terms of population characteristics, making it challenging to formulate definitive conclusions. Among the various physiological systems that influence individual health and performance, substrate metabolism is particularly noteworthy. In their review of multiple physiological systems focused on female physiology, D'Souza et al. highlighted that substrate oxidation responses at rest and during exercise across the menstrual cycle represent one of the areas with the most robust evidence, whereas less is known about the influence of hormonal contraceptive use [4]. Moreover, investigating substrate metabolism during exercise presents specific challenges, particularly due to the methods employed and the influence of inter- and intra-individual factors, such as exercise intensity and duration, body composition, nutritional status, and physical activity level, all of which can affect substrate metabolism during exercise [8–10]. Given that natural and synthetic ovarian hormones are likely to influence substrate metabolism [11,12], their interactions with factors such as nutritional status and exercise modality require further exploration through high-quality research focused on women [11,13]. The objective of the present work was, therefore, to conduct an objective assessment of the quality of existing literature in this area, based on current guidelines, using a novel assessment framework.

Additionally, this work aimed to present a general overview of the practical conditions and issues encountered in studies investigating substrate metabolism during exercise in women, both with and without the use of hormonal contraceptives.

2. METHODS

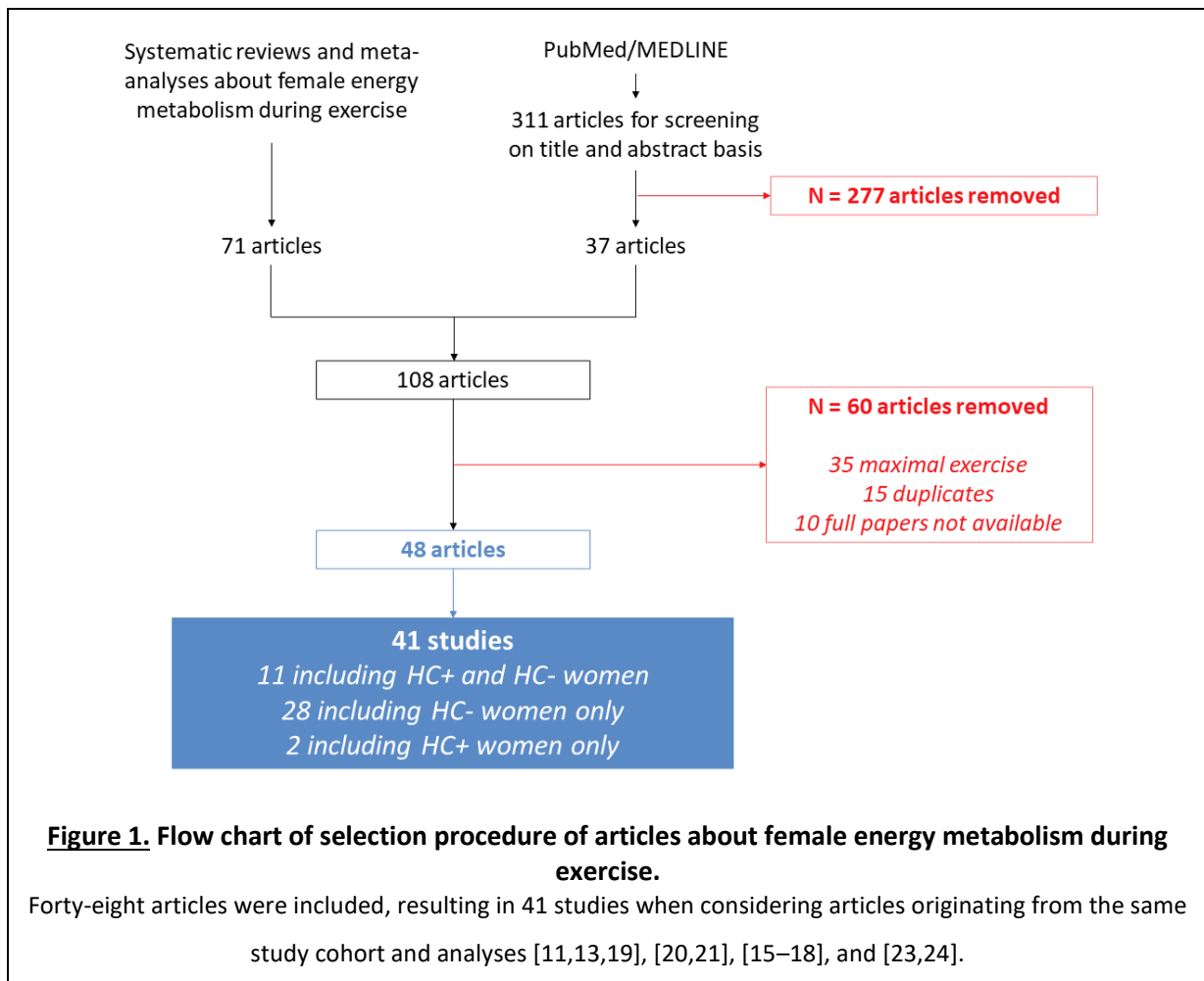
2.1. Identification and selection of studies for quality assessment

This analysis focused on studies investigating the effects of the ovarian hormonal status (menstrual cycle and/or hormonal contraceptive use) on substrate metabolism during exercise in women. Articles in English were identified through systematic reviews, meta-analyses, and searches on PubMed/MEDLINE up to November 2023, using the search terms ("menstrual cycle" OR "menstrual phase" OR "follicular" OR "luteal" OR "hormonal contracept*" OR "ovarian status" OR "eumenorrhea*") AND (("respiratory quotient" OR "respiratory exchange ratio") OR (("energy" OR "substrate" OR "fuel" OR "lipid" OR "fat" OR "carbohydrates") AND ("metabolism" OR "oxidation" OR "utilization" OR "mobilization")))) AND ("exerc*").

To be included in the present analysis, articles had to meet the following criteria: i) participants were healthy adult females of any physical activity level (ranging from sedentary to world-class athletes) [14], ii) the study included at least one group of HC- women with a specified menstrual cycle phase during which measurements were taken, or at least one group of HC+ women, and iii) the study involved any measurement of energy expenditure, substrate oxidation (e.g., respiratory quotient, fat, and/or carbohydrate oxidation rates), and/or substrate mobilization (e.g., plasma concentrations of glycerol, free fatty acids) during constant submaximal prolonged exercise (lasting at least 20 minutes) at $\leq 75\%$ maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2max}$) or incremental exercise with steady-state data for at least 5 minutes for each stage considered (with at least one stage $\leq 75\% \dot{V}O_{2max}$). Studies were excluded if they involved pregnant or breastfeeding women, women who were pre- or post-menopausal, and those with specific medications and/or diseases.

As illustrated in **Figure 1**, 48 articles were initially identified, of which 41 were included in the quality assessment. For articles originating from the same study cohort, the article deemed most relevant to the subject area (i.e., those focusing on exercise metabolism in relation to ovarian hormonal status and providing the most detailed information on subject selection, follow-up, and study design) was selected [11,13,15–21]. Although Vaiksaar et al. (2010) and Jürimae et al. (2016) shared similar protocols and population samples, both articles were retained as they reported different outcomes and analyzed different sample sizes. Similarly, the IronFEMME study was represented in four different articles [22–

25], of which three were retained for analysis [22,23,25]. Only two studies exclusively included HC+ women [26,27], while all others included at least one HC- group.



2.2. Proposed quality assessment framework

Despite growing interest in female physiology, particularly regarding the impact of ovarian hormonal status on performance, recent systematic reviews have highlighted the lack of high-quality studies within the current evidence base, with quality ratings ranging from 0-31% as "very low," 24-37% as "low," and 24-70% as "moderate" [4,6,7]. Elliott-Sale recently proposed a set of methodological guidelines, covering the essentials of study design and variable definitions, to better assess and determine the ovarian hormonal status of cis-gender female athletes (e.g., natural menstrual cycle, menstrual irregularities, use of hormonal contraceptives, pregnancy, and menopause) [28]. Additionally, Smith et al. suggested a specific methodological approach for research on female athletes, providing guidelines for assessing ovarian hormonal status and a standardized framework for

reporting key results [5]. These recommendations aim to standardize athlete selection criteria and study design, focusing on key elements to improve the quality of evidence from "low" to "high."

In HC- women, the following criteria were identified and are therefore included in this study: i) participant self-reported menstrual cycle history (duration without hormonal contraceptive use, menstrual cycle regularity, and average menstrual cycle length); ii) menstrual cycle tracking before experiments to ascertain/confirm cycle length and ovulation (via biological (blood, urine, saliva) or physiological (basal body temperature) measurements); iii) retrospective confirmation of the targeted menstrual cycle phase (including ovulation confirmation, quantifications of estradiol and progesterone to confirm the menstrual cycle phase, and of serum progesterone to verify of the absence of luteal phase deficiency ($>16 \text{ nmol.L}^{-1}$) [29]; and iv) consideration of the specific menstrual cycle phase. For HC+ women, relevant criteria include i) the history of hormonal contraceptive use (type, duration, mode of administration, formulation) and ii) the stage of hormonal contraceptive use (active or non-active).

These guidelines not only provide a framework for guiding future studies but also form the basis for evaluating the quality of existing studies. To ensure the reliability of results and conclusions drawn from such studies, additional assessment criteria were included in this analysis: i) the sample size, with 12 considered the minimum final analyzed sample size needed for reliable statistics based on current clinical trials on exercise substrate oxidation (i.e., sufficient to detect an effect size around 1, corresponding to a difference in respiratory quotient of approximately one standard deviation, with a bilateral Type I error rate of 0.17 and a statistical power greater than 0.8 ii) consistency in the measurement period for HC- women (e.g., whether measurements were conducted in the follicular and luteal phases within the same menstrual cycle), and iii) homogeneity in the type of HC used by HC+ participants (i.e., whether all participants in a group used the same HC mode/class/dose).

Outlined in **Table 1**, this novel framework can be used to assess the existing literature on exercise energy metabolism in women by assigning scores to each of the criteria from Elliott-Sale [1] and these additional added criteria. Scores range from 0 (low) to 100 (high) depending on how well the criteria are met. A score of 0% was assigned when information for a given criterion was not reported or considered, while a score of 100% was assigned when the criteria were fully met as defined by Elliott-Sale [1] or by the additional criteria. Intermediate scores for each criterion were defined by step, reflecting the degree of fulfillment of the criterion as specified in **Table 1**. Two independent reviewers conducted a double scoring, and any discrepancies in scores were discussed until consensus was reached. The scores for each criterion were then averaged to reflect the overall quality of the study design and recruitment, and thus the evidence generated. A global score below 20% was considered very low, a score between 21% and 50% was considered low, a score between 51% and 80% was considered moderate, and a score above 80% was considered high quality.

Table 1. Rating scale to estimate the level of quality of the design and recruitment processes of existing studies related to female metabolism and ovarian hormonal status.

Considerations for HC- females				
Criteria	Sub-criteria from K Elliott-Sale et al. (2021)	Summarized implications	Associated score per sub-criterion	
Recruitment	Menstrual cycle history	'Exclude female athletes who use hormonal contraceptives or have used them in the three months prior to recruitment'	No use of HC for at least 3 months 0: no or not reported 100: yes	
		'Exclude female athletes with known menstrual irregularities or pregnancy'	Regular menstrual cycle 0: no or not reported 100: yes	
		'Upon recruitment, determine typical cycle length by counting the number of days from the first day of menstruation to the day before the next onset of menstruation (must be ≥ 21 days and ≤ 35 days)'	Menstrual cycle length [21;35] days 0: no or not reported 100: yes	
	Menstrual cycle tracking prior experimentations	'Track cycle length and ovulation over two or three cycles prior to the experimental stage of the study – if ovulation has not been confirmed then these female athletes should be excluded'	Menstrual cycle tracking duration before the study	0: no or not reported 33: 1 month 67: 2 months 100: 3 months or more
			Menstrual cycle tracking for length before study	0: no or not reported 100: yes
			Menstrual cycle tracking for ovulation before the study	0: no or not reported 11: basal body temperature 33: salivary sampling 67: urinary sampling 100: blood sampling
Study design	Biological sampling and menstrual cycle phase validation	'Take a phase 4* blood sample for the determination of progesterone; this will likely be analyzed once the experimental/ data collection part of the study is over, meaning that this information may be used for retrospective exclusion if luteal phase deficiency** is evident' *Phase 4 may be defined as the commonly named mid-luteal phase **Luteal phase deficiency refers to a P4 cut-off concentration below 16 nmol.l ⁻¹ (Janse DE Jonge et al., 2019)	P4 quantification in mid-luteal 0: no quantification or not reported 20: salivary sampling 40: urinary sampling 85: blood sampling bellow or without explicit use of the cut-off of P4 >16 nmol.l ⁻¹ 100: blood sampling with explicit verification of the cut-off P4 >16 nmol.l ⁻¹	
		'Evidence of LH surge [denoting ovulation]'	Evidence of ovulation 0: no quantification or not reported 11: basal body temperature 33: salivary sampling 67: urinary sampling 100: blood sampling	
		'If possible, take a blood sample at each of the four phases of the menstrual cycle, for the determination of estrogen and progesterone, to verify (again probably retrospectively) each phase'	Quantification of E2 and P4 in each of the menstrual cycle phases studied 0: no quantification or not reported 11: basal body temperature 33: salivary sampling 67: urinary sampling 100: blood sampling	
Recruitment	Menstrual cycle exploration by the study	Considered menstrual cycle phases	0: 1 phase 50: 2 phases (follicular, luteal) 75: 3 phases 100: 4 phases (early-, mid-follicular, ovulation, mid-luteal)	
		Criteria	Additional sub-criteria	Summarized implications
Recruitment	Sample size	The number of subjects analyzed at the end of the study could be a minimum of 12 to ensure the reliability of the statistical comparisons made, as the sample sizes generally considered in studies measuring energy metabolism and substrate oxidation	Final analyzed sample size of HC-	0: 7 or less subjects analyzed 50: 8 to 11 subjects analyzed 100: 12 or more subjects analyzed

Study design	Consistency	<i>Tested menstrual cycle phases must be done in the same cycle (e.g., follicular then luteal phases in the same cycle) or two consecutive cycles (e.g., luteal in one cycle then follicular phase in the next cycle) for consistent comparison between these phases</i>	Menstrual cycle phases were tested in less than 2 consecutive cycles for comparison	0: no, not applicable or not reported 100: yes
	Considerations for HC+ females			
	Criteria	Sub-criteria from K Elliott-Sale et al. (2021)	Summarized implications	Associated score per sub-criterion
Recruitment	HC history	<i>'Recruit participants that have been using their hormonal contraceptives for at least three months prior to recruitment'</i>	Use the same type of HC for at least 3 months	0: no or not reported 100: yes
	HC type	<i>'Report the mode of administration (e.g., pill, implant, injection, intrauterine system, vaginal ring, transdermal patch)'</i>	The mode of administration of HC was reported	0: no or not reported 100: yes
<i>'Report the formulation (e.g., mono, bi or triphasic; combined or progesterone-only; names and concentration of exogenous hormones)'</i>		HC formulation was reported	0: no or not reported 100: yes	
Study design	HC status	<i>'Report the status (e.g., pill taking versus pill-free days, patch wearing versus patch-free days, how many days/months post-injection/implant)'</i>	The phases of HC status were explored	0: 1 phase (active or non-active) 100: 2 phases (active and non-active phases)
	Criteria	Additional sub-criteria	Summarized implications	Associated score per sub-criterion
Recruitment	Sample size	<i>The number of subjects analyzed at the end of the study could be a minimum of 12 to ensure the reliability of the statistical comparisons made, as the sample sizes generally considered in studies measuring energy metabolism and substrate oxidation</i>	Final number of HC+ analyzed subjects	0: 7 or less subjects analyzed 50: 8 to 11 subjects analyzed 100: 12 or more subjects analyzed
	HC homogeneity	<i>All subjects taking hormonal contraceptives should use the same mode of administration and formulation of HC (e.g., monophasic combined oral contraceptives, progestin hormonal intrauterine device) to ensure uniformity of the sample</i>	All subjects had the same HC	0: no, not applicable or not reported 75: subjects had the same type of HC but not same formulation of exogenous hormones (ex: mono-bi- and/or tri-phasic combined oral contraceptives were considered in the same group) 100: yes

E2: estradiol, HC: hormonal contraceptives, HC+: females using hormonal contraceptives, HC-: females not using hormonal contraceptives, P4: progesterone.

3. RESULTS

3.1. Quality assessment of existing knowledge base - Women not using hormonal contraceptives

The detailed and global quality scores for studies involving HC- women are presented in **Figure 2**. Out of 39 studies, only two [30,31] received at least a moderate score ($\geq 50\%$) across all seven criteria assessed. Additionally, 10 studies achieved at least a moderate score for six of the seven criteria [20,21,25,32–39]. Moreover, only one study received a high global quality score ($\geq 80\%$) [31], while 18 studies were rated as moderate quality [12,15–18,20,21,23–25,30,32–38,40–44], with only two studies scoring 70% [25,35]. Meanwhile, 18 studies were categorized as low quality (below 50%)

[11,13,19,22,39,45,46,46,47,47,48,48–52,52–58] and two studies were rated very low (below 20%) [59,60].

Across all studies, no high global quality score was observed across all criteria, and three of the six criteria achieved only moderate ratings. Concerning biological sampling criteria, only two studies out of the 39 reached a 100% score. These studies conducted blood analyses to: i) measure progesterone in the mid-luteal phase, explicitly using the 16 nmol.L⁻¹ cutoff to identify luteal deficiency, ii) detect the luteinizing hormone surge indicating ovulation, and iii) retrospectively confirm the menstrual cycle phase via estrogen and progesterone measurements [23,42]. In total, 11 studies explicitly verified that the luteal phases were not deficient using the 16 nmol.L⁻¹ threshold, as highlighted in **Figure 2**. The most commonly used methods to detect the luteinizing hormone surge, and thus ovulation, were urine sampling (12/39 studies) and continuous body temperature measurement (9/39 studies), whereas 12 studies did not explicitly measure it. Notably, 32 out of 39 studies (82%) conducted blood sampling to quantify estrogen and progesterone at different menstrual cycle phases. However, three other criteria did not achieve a moderate global quality score: menstrual cycle exploration (49%), menstrual cycle tracking (32%), and consistency (18%).

Of the 24 articles mentioning HC- eumenorrheic participants, only 12 received a 100% score for the "menstrual cycle history" criteria [12,15,23,25,31,32,35–37,40,41,43], of which two also scored 100% in menstrual tracking prior to experimentation [25,32]. These results suggest that the term "eumenorrheic" has often been used without objective confirmation of hormonal status, or that authors assumed such statements were sufficient, without needing explicit justification. It is essential to consider that some of these articles were published over 20 years ago, and the language and standards used reflect the knowledge and practices of that time, highlighting the progress made in understanding and studying female physiology.

First author, year	'Eumenorrhoeic' mention	Considerations for HC- women						Considerations for HC+ women						
		Recruitment			Design			Recruitment				Design		
		MC history	MC tracking	Sample size (n)	Biological sample	MC exploration	Consistency	Global rating (/100)	HC history	HC type	HC homogeneity	Sample size (n)	HC status	Global rating (/100)
Itoh, 2007	no			(6)				15	na	na	na	na	na	na
Matsuo, 1999	no			(7)				17	na	na	na	na	na	na
Tomten, 2006	yes			(20)				25	na	na	na	na	na	na
Bailey, 2000	yes			(9)	*			28	na	na	na	na	na	na
Oosthuysen, 2003	yes			(5)				29	na	na	na	na	na	na
Gurd, 2007	no			(7)				30	na	na	na	na	na	na
Isacco, 2012 (2014 and 2015)	yes			(10)				30	(OC)		(11)		70	
Joyce, 2013	no			(8)				31	(OC)		(8)		70	
O'Leary, 2013	yes			(10)				33	na	na	na	na	na	na
Hessemer, 1985	no			(10)	*			40	na	na	na	na	na	na
Zderic, 2001	no			(6)				41	na	na	na	na	na	na
Devries, 2006	no			(7)				43	(OC)		(6)		40	
Freemas, 2021	yes			(12)				43	na	na	na	na	na	na
Horton, 2002	yes			(10)				43	na	na	na	na	na	na
Bemben, 1992	no			(8)				44	(OC)		(8)		65	
Ortega-Santos, 2018 (a)	no			(15)				45	(OC)		(9)		60	
Janse de Jonge, 2012	no			(9)	*			46	na	na	na	na	na	na
Bonen, 1991	no			(8)				49	(OC)		(7)		80	
Dombovy, 1987	no			(8)				49	na	na	na	na	na	na
Hackney, 1991	yes			(6)				49	na	na	na	na	na	na
Vaiksaar, 2010 (b)	yes			(11)	*			50	na	na	na	na	na	na
Willett, 2021	yes			(32)				51	na	na	na	na	na	na
Williams, 2023	yes			(18)				51	(OC)		(32)		95	
Nicklas, 1989	yes			(6)	*			53	na	na	na	na	na	na
McLay, 2007	yes			(9)				54	na	na	na	na	na	na
Matsuda, 2022 (2020)	no			(11)				57	na	na	na	na	na	na
Jürimäe, 2016 (b)	yes			(13)	*			58	na	na	na	na	na	na
Armstrong, 2005	yes			(14)	*			59	(OC, INJ)		(22)		75	
Beidleman, 2002	no			(8)	*			59	na	na	na	na	na	na
Casazza, 2004 (Suh, 2002 and 2003; Jacobs, 2005)	yes			(6)				59	(OC)		(8)		90	
De Souza, 1990	yes			(8)				60	na	na	na	na	na	na
Dokumaci, 2019	yes			(11)	*			61	na	na	na	na	na	na
Campbell, 2001	yes			(8)				62	na	na	na	na	na	na
Peinado, 2021 (Rael, 2021) (a)	yes			(21)	*			63	(OC)		(16)		100	
Dean, 2003	yes			(8)				69	na	na	na	na	na	na
Redman, 2003	no			(14)				69	na	na	na	na	na	na
Ruiz-Alias, 2024	yes			(15)				72	na	na	na	na	na	na
Benito, 2023 (a)	yes			(13)	*			77	na	na	na	na	na	na
Mattu, 2020	yes			(15)				81	(OC)		(15)		100	
Giacomoni, 2000	na	na	na	na	na	na	na	na	(OC)		(10)		90	
Rechichi, 2008	na	na	na	na	na	na	na	na	(OC)		(13)		100	
Mean score (/100)	na	74	33	53	66	49	18	49	85	96	94	62	62	80

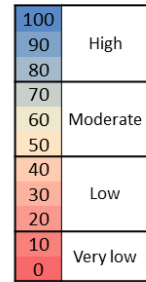


Figure 2. Heatmap of the quality assessment scoring of the design and recruitment processes of existing studies related to exercise metabolism and ovarian hormonal status.

(a): articles related to the IronFEMME study.

(b): similar cohort but not similar data collection and study design.

* : studies with investigation of the luteal phase deficiency (progesterone concentration in mid-luteal phase >16 nmol.l⁻¹).

The type of HC used by the participants in each study is detailed in **Table S1**.

HC: hormonal contraceptives, HC+: females using hormonal contraceptives, HC-: females not using hormonal contraceptives, INJ: injection, MC: menstrual cycle, na: not applicable (*i.e.*, study did not include HC+ females), OC: oral contraception.

3.2. Quality assessment of existing knowledge base - Women using hormonal contraceptives

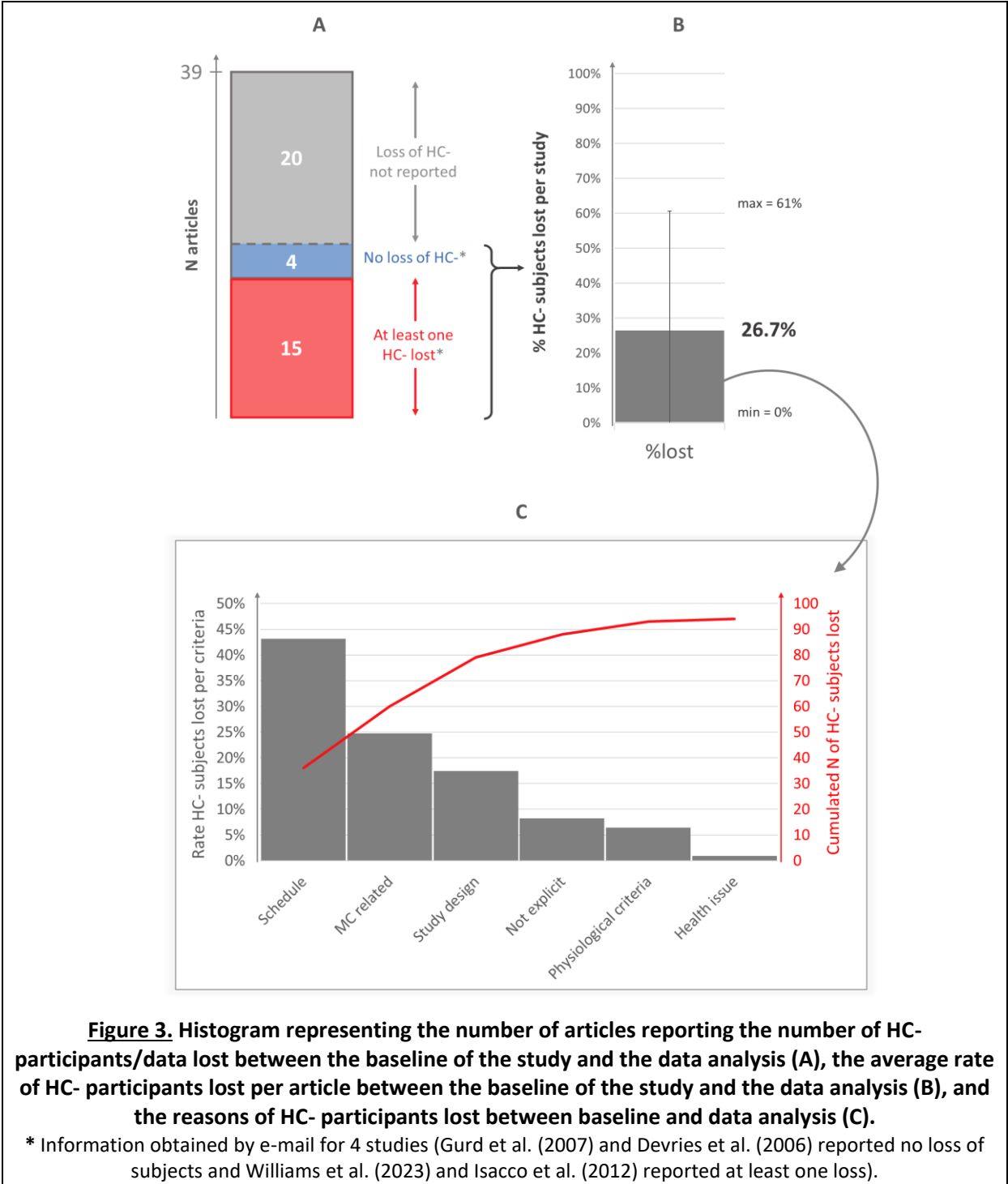
Among the 41 studies included in the quality assessment, 11 involved HC+ women, with two studies exclusively focusing on HC+ participants (comparing active versus inactive phases) [26,27]. Three studies received a 100% score for all five criteria [23,27,31] and four studies scored 100% in four out of five criteria [15,26,43,61]. Only one study received a global score below 50%, with a low score of 40% [47]. High-quality scores were observed for HC type (96%), HC homogeneity (94%), and HC history (85%). All studies on HC+ women involved participants using combined oral contraception, with only one study including a group using progestin injections [42] (**Figure 2, Supplementary file 1**). This suggests a need for future research to consider other forms of hormonal contraceptives, such as patches, vaginal rings, or implants. The average global scores indicate that the quality of studies involving HC+ women (80%) tends to be higher than those involving HC- women (49%), despite fewer studies in this population, with overall study quality remaining moderate.

This disparity in quality may reflect the methodological challenges associated with tracking menstrual cycles before and during protocols (e.g., ovulation confirmation, estradiol and progesterone quantification to confirm menstrual cycle phases, and luteal phase deficiency verification). These technical and feasibility limitations likely contribute to difficulties in recruiting participants and obtaining meaningful results related to substrate metabolism during exercise in women. Indeed, these challenges are reflected in the low sample sizes observed in this research area (11 ± 5 HC- and 13 ± 7 HC+ participants per study, respectively; mean \pm standard deviation).

4. DISCUSSION

4.1. Sample sizes and loss of data: a negative consequence of high-quality study design?

In the quality assessment described above, sample size was defined as the number of participants included in the final data analysis rather than the number that commenced the study. When this information was not explicitly stated in the full-text articles, the authors were contacted to obtain further details. Reasons for exclusion or data loss were also recorded when available. For studies involving HC+ women, the number of baseline versus analyzed subjects was not provided in 10 out of 13 studies due to various reasons, such as lack of reporting, only one visit in the active hormone phase, or no clear distinction between HC+ and HC- data loss [22,26,27,31,42,43,46,47,54,61]. Consequently, analyses of data loss were only conducted for HC- women, as shown in **Figure 3**.



Among the 39 studies involving HC- women, half (20/39) did not report participant loss. Of the 19 studies that did report this information, only four indicated no loss of participants, meaning all individuals recruited completed the study. The remaining 15 studies reported at least one participant lost between baseline and data analysis [37,47,49,56]. The average loss rate among HC- participants per study was 26.7%, ranging from 0% [37,47,49,56] to 61% [25].

The reasons for participant loss varied: schedule incompatibilities, such as subjects being unavailable during the targeted menstrual cycle phase (38.7%); menstrual cycle-related factors (25.8%); study design difficulties, such as fear of needles or inability to complete exercise at a given intensity (20.4%); unspecified reasons (9.7%); physiological criteria like out-of-range physiological values (5.4%); and health issues (1.1%).

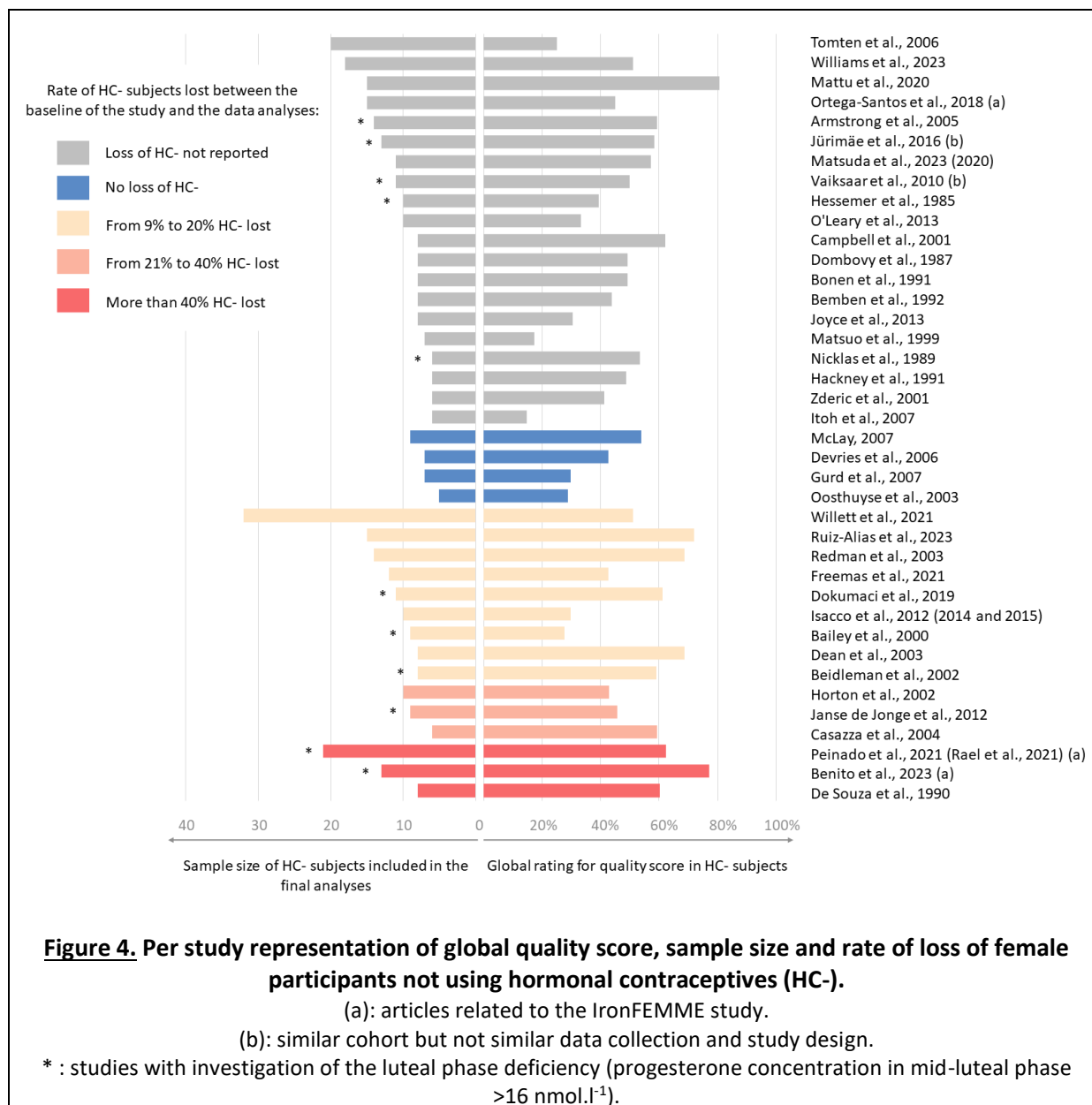
Menstrual cycle-related reasons for data exclusion included retrospectively inadequate estrogen and/or progesterone concentrations (33.3%, with 60.4% showing luteal phase deficiency) [15,35,45,53]; irregular menstrual cycle (20.8%) [23,25,48]; anovulatory cycle (20.8%) [12,23,25,52]; non-confirmation of the targeted menstrual cycle phase (16.7%) [52,53]; and inadequate menstrual cycle documentation (8.3%) [38].

These findings suggest that investigating the role of the menstrual cycle in substrate metabolism during exercise poses significant challenges, leading to considerable data loss, especially during retrospective hormonal analyses. It may be hypothesized that studies designed with higher quality, such as those examining multiple menstrual cycle phases with blood ovarian hormone analyses, may encounter greater difficulties in recruiting and retaining the targeted number of participants from baseline through final data analysis.

Figure 4 illustrates the number of HC- women included in the final analyses of studies according to their overall quality score and participant attrition rate for those that reported it. Contrary to what might be assumed, the number of participants included in the final analysis does not correlate with quality assessment scores. Furthermore, a high participant loss rate is not systematically associated with a low number of participants in the final analysis.

Interestingly, the three studies with more than 40% participant loss had a mean global quality score of $66.6 \pm 9.3\%$ [23,25,36], while the three studies with a 21-40% loss rate had a mean score of $49.3 \pm 8.8\%$ [15,52,53]. The nine studies with a 9-20% loss rate had a mean quality score of $53.5 \pm 16.7\%$ [12,19,30,32,34,35,38,45,48], and the four studies reporting no participant loss had a mean quality score of $38.8 \pm 11.9\%$ [37,47,49,56].

These findings suggest that studies with higher participant loss and data exclusion tend to achieve higher global quality scores, potentially reflecting more rigorous data selection processes. However, it is noteworthy that many studies did not report participant loss. In light of these challenges, over-recruitment may be advisable in studies of female physiology to account for potential dropouts or retrospective exclusions.



4.2. Further issues and challenges highlighted

Beyond the inherent limitations related to the objectives of the studies discussed, additional methodological and practical constraints should be considered, as these could further compromise the quality and reliability of conclusions on exercise metabolism, or indeed the assessment of various physiological measures. One significant challenge is the practical difficulty of objectively tracking the menstrual cycle before an experimental phase, particularly with regard to ovulation. This process not only increases participant burden and cost but also introduces complexities in study design.

Many studies included in this review either tracked the menstrual cycle for too short a duration (i.e., less than 3 months) [31,36,38,42] or relied on self-reported menstrual cycle length without verifying

ovulation [40,41,43,53]. Objective menstrual cycle tracking before experimentation is essential to reduce the risk of including participants with menstrual cycle dysfunctions (e.g., anovulatory cycles, oligomenorrhea) if such conditions are exclusion criteria.

Moreover, it is important to consider the inclusion of women with menstrual cycle dysfunctions (e.g., anovulatory cycles, luteal phase deficiency) in studies [62], as these conditions are prevalent among both the general and athlete populations [63,64]. However, even with these precautions, the inherent intra-individual variability in menstrual cycles makes it difficult to predict future cycle characteristics accurately or to reliably target specific (sub)phases of the cycle [4].

Additionally, there is a lack of consensus and clarity in defining the phases of the menstrual cycle, with studies dividing it into 2 to 5 phases based on ovarian hormone concentrations [32]. In response to this, Elliott-Sale et al. proposed targeting four "key phases" that represent distinct ovarian hormone profiles within the menstrual cycle (Elliott-Sale et al., 2021). However, feedback from some research groups indicates that this approach can complicate the scheduling of study visits to align with the targeted phase or moment of the menstrual cycle.

Biological ovarian hormone analyses under standardized conditions are therefore essential for retrospectively confirming the targeted phase(s). However, the lack of emphasis on hormonal profiling and endocrine assessments is a notable weakness in some study designs [65]. Despite these challenges, most of the included studies did provide information on ovarian hormone concentrations, which helps support the reliability of their results and conclusions, though this often comes at the cost of excluding data that do not meet criteria. To address the difficulties of performing blood measurements in natural daily settings (i.e., outside of a laboratory environment), some researchers have turned to more practical and non-invasive alternatives, such as saliva or urine analyses [12,31,35,43,48]. These methods offer a feasible compromise but may also introduce variability that could impact the accuracy of hormone measurements and the subsequent conclusions drawn from the data.

5. CONCLUSION

To conclude, this report provides a comprehensive overview of the quality of the existing knowledge base regarding exercise metabolism in women, comparing it against study design and reporting guidelines, and highlighting various challenges and issues encountered in conducting research in this area. Based on the results of the quality assessment and the global scores obtained, it appears that high-quality research may be easier to achieve in studies involving HC+ women, although there are far fewer studies, compared to those involving HC-women.

Studies focusing on women not using hormonal contraceptives face more practical challenges, such as tracking the menstrual cycle, measuring underlying ovarian hormone concentrations, and targeting specific (sub)phases of the menstrual cycle. Although biological analyses significantly enhance data quality, retrospective confirmation of estrogen and progesterone concentrations poses methodological difficulties (e.g., feasibility in a natural daily setting, subjects' aversion to needles, rescheduling of visits), potentially resulting in considerable data loss (e.g., incorrect concentrations, loss of follow-up).

Conversely, the practice of tracking the menstrual cycle prior to the commencement of a study—particularly for the recommended duration of three months or more—is uncommon and often of poor quality. However, objectively confirming ovulation, the absence of luteal phase deficiency, and the regularity of menstrual cycles, not only in terms of their length but also in hormonal concentrations, is essential to ensure the absence of menstrual dysfunction and to accurately characterize each participant's menstrual cycle and the well-recognized intra-individual cycle variability.

Moreover, replicated crossover study designs would be valuable for gaining deeper insights in this area. Ideally, female participants should be assessed across multiple menstrual cycles to confirm the reliability and reproducibility of the results and conclusions [5], although none of the 41 studies included in this analysis employed this approach. Furthermore, many studies have failed to mention important quality criteria, further complicating efforts to draw reliable conclusions from the existing data. The use of terms such as "eumenorrhea" without clear definition or objective justification should be discouraged.

In sum, a concerted effort is required to improve the quality of studies investigating the effect of ovarian hormonal status on exercise metabolism, particularly concerning the effects of menstrual cycling. While frameworks for the design of such studies do exist, this assessment of current literature indicates that their practical implementation may present significant challenges.

STATEMENTS AND DECLARATIONS

Funding: International Research Chair Health in Motion.

Conflicts of interest: No conflict of interest to declare. The present study does not constitute an endorsement by the American College of Sports Medicine and is presented honestly and without fabrication, falsification, or inappropriate data manipulation.

Author contributions: Conceptualization: J.MC., AC.H., M.D., L.I.; Data curation: S.B.; Writing – Original Draft: S.B.; Writing – Review & Editing: S.B., J.MC., AC.H., M.D. L.I.; Supervision, Validation: M.D.; L.I.

REFERENCES

- [1] Elliott-Sale KJ, Minahan CL, de Jonge XAKJ, Ackerman KE, Sipilä S, Constantini NW, et al. Methodological Considerations for Studies in Sport and Exercise Science with Women as Participants: A Working Guide for Standards of Practice for Research on Women. *Sports Medicine* 2021;51:843–61. <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01435-8>.
- [2] Cowley ES, Olenick AA, McNulty KL, Ross EZ. “Invisible Sportswomen”: The Sex Data Gap in Sport and Exercise Science Research. *Women in Sport and Physical Activity Journal* 2021;29:146–51. <https://doi.org/10.1123/wspaj.2021-0028>.
- [3] Dole A, Beaven M, Sims ST. Menstrual Cycle Tracking in Sports Research: Challenges, Progress, and Future Directions. *Physiologia* 2023;3:598–610. <https://doi.org/10.3390/physiologia3040044>.
- [4] D’Souza AC, Wageh M, Williams JS, Colenso-Semple LM, McCarthy DG, McKay AKA, et al. Menstrual cycle hormones and oral contraceptives: a multimethod systems physiology-based review of their impact on key aspects of female physiology. *J Appl Physiol* (1985) 2023;135:1284–99. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00346.2023>.
- [5] Smith ES, McKay AKA, Ackerman KE, Harris R, Elliott-Sale KJ, Stellingwerff T, et al. Methodology Review: A Protocol to Audit the Representation of Female Athletes in Sports Science and Sports Medicine Research 2022. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2021-0257>.
- [6] Elliott-Sale KJ, McNulty KL, Ansdell P, Goodall S, Hicks KM, Thomas K, et al. The Effects of Oral Contraceptives on Exercise Performance in Women: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Med* 2020;50:1785–812. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01317-5>.
- [7] McNulty KL, Elliott-Sale KJ, Dolan E, Swinton PA, Ansdell P, Goodall S, et al. The Effects of Menstrual Cycle Phase on Exercise Performance in Eumenorrhic Women: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med* 2020;50:1813–27. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01319-3>.
- [8] Boisseau N, Isacco L. Substrate metabolism during exercise: Sexual dimorphism and women’s specificities. *Eur J Sport Sci* 2022;22:672–83. <https://doi.org/10.1080/17461391.2021.1943713>.
- [9] Jeukendrup AE. Modulation of carbohydrate and fat utilization by diet, exercise and environment. *Biochem Soc Trans* 2003;31:1270–3. <https://doi.org/10.1042/bst0311270>.
- [10] Jeukendrup AE, Wallis GA. Measurement of substrate oxidation during exercise by means of gas exchange measurements. *Int J Sports Med* 2005;26 Suppl 1:S28-37. <https://doi.org/10.1055/s-2004-830512>.
- [11] Isacco L, Thivel D, Pereira B, Duclos M, Boisseau N. Maximal fat oxidation, but not aerobic capacity, is affected by oral contraceptive use in young healthy women. *Eur J Appl Physiol* 2015;115:937–45. <https://doi.org/10.1007/s00421-014-3075-7>.
- [12] Willett HN, Koltun KJ, Hackney AC. Influence of Menstrual Cycle Estradiol- β -17 Fluctuations on Energy Substrate Utilization-Oxidation during Aerobic, Endurance Exercise. *Int J Environ Res Public Health* 2021;18:7209. <https://doi.org/10.3390/ijerph18137209>.
- [13] Isacco L, Thivel D, Meddahi-Pelle A, Lemoine-Morel S, Duclos M, Boisseau N. Exercise per se masks oral contraceptive-induced postprandial lipid mobilization. *Appl Physiol Nutr Metab* 2014;39:1222–9. <https://doi.org/10.1139/apnm-2014-0053>.
- [14] McKay AKA, Stellingwerff T, Smith ES, Martin DT, Mujika I, Goosey-Tolfrey VL, et al. Defining Training and Performance Caliber: A Participant Classification Framework. *Int J Sports Physiol Perform* 2022;17:317–31. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2021-0451>.
- [15] Casazza GA, Jacobs KA, Suh S-H, Miller BF, Horning MA, Brooks GA. Menstrual cycle phase and oral contraceptive effects on triglyceride mobilization during exercise. *J Appl Physiol* (1985) 2004;97:302–9. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00050.2004>.

- [16] Suh S-H, Casazza GA, Horning MA, Miller BF, Brooks GA. Luteal and follicular glucose fluxes during rest and exercise in 3-h postabsorptive women. *Journal of Applied Physiology* 2002;93:42–50. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01080.2001>.
- [17] Suh S-H, Casazza GA, Horning MA, Miller BF, Brooks GA. Effects of oral contraceptives on glucose flux and substrate oxidation rates during rest and exercise. *J Appl Physiol* (1985) 2003;94:285–94. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00693.2002>.
- [18] Jacobs KA, Casazza GA, Suh S-H, Horning MA, Brooks GA. Fatty acid reesterification but not oxidation is increased by oral contraceptive use in women. *J Appl Physiol* (1985) 2005;98:1720–31. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00685.2004>.
- [19] Isacco L, Thivel D, Pelle AM, Zouhal H, Duclos M, Duche P, et al. Oral contraception and energy intake in women: impact on substrate oxidation during exercise. *Appl Physiol Nutr Metab* 2012;37:646–56. <https://doi.org/10.1139/h2012-031>.
- [20] Matsuda T, Takahashi H, Nakamura M, Ogata H, Kanno M, Ishikawa A, et al. Influence of the Menstrual Cycle on Muscle Glycogen Repletion After Exhaustive Exercise in Eumenorrhic Women. *J Strength Cond Res* 2022. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004306>.
- [21] Matsuda T, Ogata H, Kanno M, Ishikawa A, Yamada M, Sakamaki-Sunaga M. Effects of the menstrual cycle on oxidative stress and antioxidant response to high-intensity intermittent exercise until exhaustion in healthy women. *J Sports Med Phys Fitness* 2020;60:1335–41. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.20.10868-5>.
- [22] Ortega-Santos CP, Barba-Moreno L, Cupeiro R, Peinado AB. Substrate oxidation in female adults during endurance exercise throughout menstrual cycle phases: IronFEMME pilot study. *Journal of Human Sport and Exercise* 2018;13:553–65. <https://doi.org/10.14198/jhse.2018.133.07>.
- [23] Peinado AB, Alfaro-Magallanes VM, Romero-Parra N, Barba-Moreno L, Rael B, Maestre-Cascales C, et al. Methodological Approach of the Iron and Muscular Damage: Female Metabolism and Menstrual Cycle during Exercise Project (IronFEMME Study). *Int J Environ Res Public Health* 2021;18:735. <https://doi.org/10.3390/ijerph18020735>.
- [24] Rael B, Alfaro-Magallanes VM, Romero-Parra N, Castro EA, Cupeiro R, Janse de Jonge XAK, et al. Menstrual Cycle Phases Influence on Cardiorespiratory Response to Exercise in Endurance-Trained Females. *Int J Environ Res Public Health* 2021;18:860. <https://doi.org/10.3390/ijerph18030860>.
- [25] Benito PJ, Alfaro-Magallanes VM, Rael B, Castro EA, Romero-Parra N, Rojo-Tirado MA, et al. Effect of Menstrual Cycle Phase on the Recovery Process of High-Intensity Interval Exercise-A Cross-Sectional Observational Study. *Int J Environ Res Public Health* 2023;20:3266. <https://doi.org/10.3390/ijerph20043266>.
- [26] Giacomoni M, Falgairette G. Decreased submaximal oxygen uptake during short duration oral contraceptive use: a randomized cross-over trial in premenopausal women. *Ergonomics* 2000;43:1559–70. <https://doi.org/10.1080/001401300750003989>.
- [27] Rechichi C, Dawson B, Goodman C. Oral contraceptive phase has no effect on endurance test. *Int J Sports Med* 2008;29:277–81. <https://doi.org/10.1055/s-2007-965334>.
- [28] Elliott-Sale K. Ovarian Hormones: How to Conduct High-Quality Sport and Exercise Science Research on Female Athletes. *Sports Science Exchange* 2023;36:1–7.
- [29] Janse DE Jonge X, Thompson B, Han A. Methodological Recommendations for Menstrual Cycle Research in Sports and Exercise. *Med Sci Sports Exerc* 2019;51:2610–7. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002073>.
- [30] Dean TM, Perreault L, Mazzeo RS, Horton TJ. No effect of menstrual cycle phase on lactate threshold. *J Appl Physiol* (1985) 2003;95:2537–43. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00672.2003>.
- [31] Mattu AT, Iannetta D, MacInnis MJ, Doyle-Baker PK, Murias JM. Menstrual and oral contraceptive cycle phases do not affect submaximal and maximal exercise responses. *Scand J Med Sci Sports* 2020;30:472–84. <https://doi.org/10.1111/sms.13590>.

- [32] Dokumacı B, Hazır T. Effects of the Menstrual Cycle on Running Economy: Oxygen Cost Versus Caloric Cost. *Res Q Exerc Sport* 2019;90:318–26. <https://doi.org/10.1080/02701367.2019.1599800>.
- [33] Campbell SE, Angus DJ, Febbraio MA. Glucose kinetics and exercise performance during phases of the menstrual cycle: effect of glucose ingestion. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 2001;281:E817-25. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.2001.281.4.e817>.
- [34] Redman LM, Scroop GC, Norman RJ. Impact of menstrual cycle phase on the exercise status of young, sedentary women. *Eur J Appl Physiol* 2003;90:505–13. <https://doi.org/10.1007/s00421-003-0889-0>.
- [35] Ruiz-Alias SA, Pérez-Castilla A, Marcos-Blanco A, Moreno-Ortega C, Fernández-Navarrete I, García-Pinillos F. The Variability of the Components of Fitness along the Menstrual Cycle. *Int J Sports Med* 2024. <https://doi.org/10.1055/a-2192-8631>.
- [36] De Souza MJ, Maguire MS, Rubin KR, Maresh CM. Effects of menstrual phase and amenorrhea on exercise performance in runners. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 1990;22:575.
- [37] McLay RT, Thomson CD, Williams SM, Rehrer NJ. Carbohydrate loading and female endurance athletes: effect of menstrual-cycle phase. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 2007;17:189–205. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.17.2.189>.
- [38] Beidleman BA, Rock PB, Muza SR, Fulco CS, Gibson LL, Kamimori GH, et al. Substrate oxidation is altered in women during exercise upon acute altitude exposure. *Med Sci Sports Exerc* 2002;34:430–7. <https://doi.org/10.1097/00005768-200203000-00008>.
- [39] Dombrov ML, Bonekat HW, Williams TJ, Staats BA. Exercise performance and ventilatory response in the menstrual cycle. *Med Sci Sports Exerc* 1987;19:111–7.
- [40] Vaiksaar S, Jürimäe J, Mäestu J, Purge P, Kalytko S, Shakhlina L, et al. No effect of menstrual cycle phase and oral contraceptive use on endurance performance in rowers. *J Strength Cond Res* 2011;25:1571–8. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181df7fd2>.
- [41] Jürimäe J, Vaiksaar S, Purge P, Jürimäe T. Adiponectin and osteocalcin responses to rowing exercise, and the relationship to substrate oxidation in female rowers. *Physiol Int* 2016;103:220–30. <https://doi.org/10.1556/036.103.2016.2.9>.
- [42] Armstrong LE, Maresh CM, Keith NR, Elliott TA, Vanheest JL, Scheett TP, et al. Heat acclimation and physical training adaptations of young women using different contraceptive hormones. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 2005;288:E868-875. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00434.2004>.
- [43] Williams JS, Stone JC, Masood Z, Bostad W, Gibala MJ, MacDonald MJ. The impact of natural menstrual cycle and oral contraceptive pill phase on substrate oxidation during rest and acute submaximal aerobic exercise. *J Appl Physiol (1985)* 2023;135:642–54. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00111.2023>.
- [44] Nicklas BJ, Hackney AC, Sharp RL. The menstrual cycle and exercise: performance, muscle glycogen, and substrate responses. *Int J Sports Med* 1989;10:264–9. <https://doi.org/10.1055/s-2007-1024913>.
- [45] Bailey SP, Zacher CM, Mittleman KD. Effect of menstrual cycle phase on carbohydrate supplementation during prolonged exercise to fatigue. *J Appl Physiol (1985)* 2000;88:690–7. <https://doi.org/10.1152/jappl.2000.88.2.690>.
- [46] Bemben DA, Boileau RA, Bahr JM, Nelson RA, Misner JE. Effects of oral contraceptives on hormonal and metabolic responses during exercise. *Med Sci Sports Exerc* 1992;24:434–41.
- [47] Devries MC, Hamadeh MJ, Phillips SM, Tarnopolsky MA. Menstrual cycle phase and sex influence muscle glycogen utilization and glucose turnover during moderate-intensity endurance exercise. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 2006;291:R1120-1128. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00700.2005>.
- [48] Freemans JA, Baranauskas MN, Constantini K, Constantini N, Greenshields JT, Mickleborough TD, et al. Exercise Performance Is Impaired during the Midluteal Phase of the Menstrual Cycle. *Med Sci Sports Exerc* 2021;53:442–52. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002464>.

- [49] Gurd BJ, Scheid J, Paterson DH, Kowalchuk JM. O₂ uptake and muscle deoxygenation kinetics during the transition to moderate-intensity exercise in different phases of the menstrual cycle in young adult females. *Eur J Appl Physiol* 2007;101:321–30. <https://doi.org/10.1007/s00421-007-0505-9>.
- [50] Hackney AC, Curley CS, Nicklas BJ. Physiological responses to submaximal exercise at the mid-follicular, ovulatory and mid-luteal phases of the menstrual cycle. *Scand J Med Sci Sports* 1991;1:94–8. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.1991.tb00277.x>.
- [51] Hessemer V, Bruck K. Influence of menstrual cycle on thermoregulatory, metabolic, and heart rate responses to exercise at night. *Journal of Applied Physiology* 1985;59:1911–7. <https://doi.org/10.1152/jappl.1985.59.6.1911>.
- [52] Horton TJ, Miller EK, Glueck D, Tench K. No effect of menstrual cycle phase on glucose kinetics and fuel oxidation during moderate-intensity exercise. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 2002;282:E752–762. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00238.2001>.
- [53] Janse DE Jonge XAK, Thompson MW, Chuter VH, Silk LN, Thom JM. Exercise performance over the menstrual cycle in temperate and hot, humid conditions. *Med Sci Sports Exerc* 2012;44:2190–8. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3182656f13>.
- [54] Joyce S, Sabapathy S, Bulmer A, Minahan C. Effect of long-term oral contraceptive use on determinants of endurance performance. *J Strength Cond Res* 2013;27:1891–6. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3182736935>.
- [55] O’Leary CB, Lehman C, Koltun K, Smith-Ryan A, Hackney AC. Response of testosterone to prolonged aerobic exercise during different phases of the menstrual cycle. *Eur J Appl Physiol* 2013;113:2419–24. <https://doi.org/10.1007/s00421-013-2680-1>.
- [56] Oosthuysen T, Bosch AN, Jackson S. Effect of menstrual phase on the acetate correction factor used in metabolic tracer studies. *Can J Appl Physiol* 2003;28:818–30. <https://doi.org/10.1139/h03-061>.
- [57] Tomten SE, Høstmark AT. Energy balance in weight stable athletes with and without menstrual disorders. *Scand J Med Sci Sports* 2006;16:127–33. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2005.00451.x>.
- [58] Zderic TW, Coggan AR, Ruby BC. Glucose kinetics and substrate oxidation during exercise in the follicular and luteal phases. *J Appl Physiol (1985)* 2001;90:447–53. <https://doi.org/10.1152/jappl.2001.90.2.447>.
- [59] Itoh M, Ueoka H, Aoki T, Hotta N, Kaneko Y, Takita C, et al. Exercise hyperpnea and hypercapnic ventilatory responses in women. *Respir Med* 2007;101:446–52. <https://doi.org/10.1016/j.rmed.2006.07.011>.
- [60] Matsuo T, Saitoh S, Suzuki M. Effects of the menstrual cycle on excess postexercise oxygen consumption in healthy young women. *Metabolism* 1999;48:275–7. [https://doi.org/10.1016/s0026-0495\(99\)90071-9](https://doi.org/10.1016/s0026-0495(99)90071-9).
- [61] Bonen A, Haynes FW, Graham TE. Substrate and hormonal responses to exercise in women using oral contraceptives. *J Appl Physiol (1985)* 1991;70:1917–27. <https://doi.org/10.1152/jappl.1991.70.5.1917>.
- [62] Noordhof DA, Taylor MY, De Martin Topranin V, Engseth TP, Sandbakk Ø, Osborne JO. Agreement Between the 2- and 3-Step Methods for Identifying Subtle Menstrual Disturbances. *Int J Sports Physiol Perform* 2024;19:953–7. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2024-0057>.
- [63] Deligeoroglou E, Creatsas G. Menstrual disorders. *Endocr Dev* 2012;22:160–70. <https://doi.org/10.1159/000331697>.
- [64] Taim BC, Ó Catháin C, Renard M, Elliott-Sale KJ, Madigan S, Ní Chéilleachair N. The Prevalence of Menstrual Cycle Disorders and Menstrual Cycle-Related Symptoms in Female Athletes: A Systematic Literature Review. *Sports Med* 2023;53:1963–84. <https://doi.org/10.1007/s40279-023-01871-8>.
- [65] Hackney AC, Viru A. Research methodology: endocrinologic measurements in exercise science and sports medicine. *J Athl Train* 2008;43:631–9. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-43.6.631>.

SUPPLEMENTARY TABLE

Table S1. Table summarizing the types of hormonal contraceptive used by women in the studies included in the analysis.

Reference including HC+ women	Type of HC
Armstrong, 2005	OC (N=15): combined (mono-, bi-, triphasic): EE (35 µg) + progestin (details per subject provided in the original article) Injection (N=7): progestin only: depot medroxyprogesterone acetate
Bemben, 1992	OC : combined (mono- (N=5), bi- (N=1), or triphasic (N=2)): EE (35 µg) + progestin (details per subject provided in the original article)
Bonen, 1991	OC : combined monophasic: EE + progestin (details per subject provided in the original article)
Casazza, 2004	OC : combined triphasic: EE (35 µg) + norgestimate
Devries, 2006	OC : combined triphasic: EE + progestin
Giacomini, 2000	OC : combined monophasic: EE (20 to 30 µg) + progestin (150 µg desogestrel or 75 µg gestodene)
Isacco, 2012	OC : combined monophasic low-dose: EE (20 or 30 µg) + progestin (gestodene or levonorgestrel)
Joyce, 2013	OC : combined monophasic: EE (30 or 35 µg) + progestin (150µg levonorgestrel or 200µg cyproterone, respectively)
Mattu, 2020	OC : combined monophasic low-regular dose, 2nd (N=10) or 3rd (N=5) generations: EE (20 to 35 µg) + progestin (100-200 µg)
Ortega-Santos, 2018	OC : combined monophasic
Peinado, 2021	OC : combined monophasic: EE (20 to 35 µg) + progestin (details provided in the original article)
Rechichi, 2008	OC : combined monophasic: EE (20 to 35 µg) + progestin (details per subject provided in the original article)
Williams, 2023	OC : combined monophasic 2nd generation (N=17): EE (20 µg) + levonorgestrel (100 µg) Or combined mono- or triphasic, 3rd generation (N=15): EE (25 to 35 µg) + progestin (details per subject provided in the original article)

'Combined' means that the hormonal contraception contains both estrogen and progestin.

OC: oral contraception, EE: ethinyl estradiol.

AXE III

—

ADAPTATIONS ÉNERGÉTIQUES AU STATUT HORMONAL OVARIEN CHEZ LES ATHLÈTES FÉMININES EN PÉRIODE DE HAUTE CHARGE D'ENTRAÎNEMENT. L'ÉTUDE CAT WOMEN

Méthodologie générale de l'étude CAT Women

I. Participantes

Des athlètes féminines pratiquant des sports d'équipe (rugby et football) issues de deux clubs locaux ont participé à ce suivi de cohorte au cours des saisons sportives 2021-2022 et 2022-2023. Pour être éligibles, les participantes devaient être âgées de 18 à 40 ans et performer à un niveau national ou international. L'étude a inclus les femmes présentant une aménorrhée primaire ou secondaire, utilisant des contraceptifs hormonaux, ou ayant un cycle menstruel naturel d'une durée comprise entre 21 et 38 jours pendant les six mois précédant le début de l'étude. En revanche, les femmes sous médication (autre que la contraception hormonale), enceintes ou allaitantes ont été exclues.

Toutes les expériences ont été menées conformément à la Déclaration d'Helsinki, et des consentements éclairés écrits ont été obtenus de toutes les athlètes.

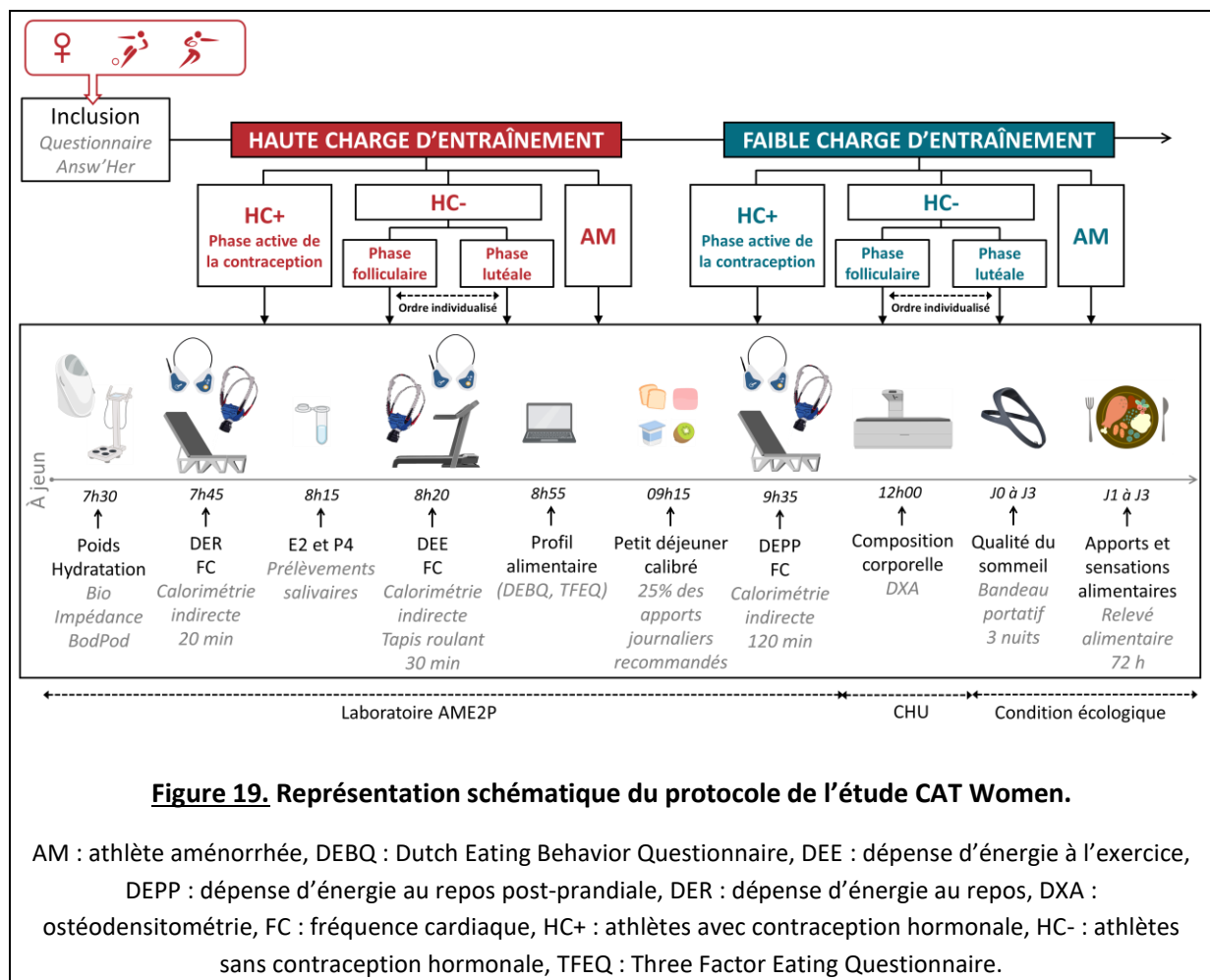
II. Protocole expérimental de l'étude CAT Women

Après la visite d'inclusion, chaque participante a complété le questionnaire Answ'Her pour caractériser son statut hormonal ovarien. Puis, les athlètes se sont rendues au laboratoire à deux ou quatre reprises, en fonction de leur statut hormonal et de leur charge d'entraînement, déterminé par leur préparateur physique :

- Pour les athlètes utilisant une contraception hormonale (HC+, 2 visites expérimentales) : une visite en phase active de la contraception hormonale en haute charge d'entraînement, et une autre en faible charge d'entraînement.
- Pour les athlètes ayant un cycle menstruel naturel (HC-, 4 visites expérimentales) : une visite en phase folliculaire et une en phase lutéale, chacune réalisée en haute charge d'entraînement, et de même en faible charge d'entraînement. L'ordre des visites entre les phases du cycle menstruel était individualisé.
- Pour les athlètes aménorrhée (2 visites expérimentales) : une visite en haute charge d'entraînement et une autre en faible charge d'entraînement.

Les participantes ont informé régulièrement l'investigateur de leur premier jour de menstruations ou de saignements tout au long de la période expérimentale pour faciliter la planification des visites. Chaque visite s'est déroulée de manière identique. Les participantes arrivaient au laboratoire à 7h30

après une nuit de 12 heures de jeûne pour entamer une série de mesures illustrées en **Figure 19**. Dans le cadre de ce projet de thèse, une attention particulière sera portée aux mesures de composition corporelle, du métabolisme énergétique, et de la fréquence cardiaque au repos à jeun, lors d'un exercice de faible intensité sur tapis roulant (4 km.h⁻¹), et au repos en condition post-prandiale (25% des apports journaliers recommandés (Gibney et al. 2018) : 50% de glucides, 35% de lipides et 15% de protéines). À la fin de chaque matinée, un bandeau à porter sur la tête durant 3 nuits et un relevé alimentaire à compléter sur 3 jours consécutifs ont été remis aux participantes. Les méthodes correspondant aux résultats en L'ensemble de ce protocole et des mesures sera détaillé dans la présentation de la contribution personnelle relative.



III. Travaux de thèse issus de l'étude CAT Women

Afin de répondre aux objectifs de la thèse, une partie des mesures de l'étude CAT Women a été exploitée. Une étude issue de l'analyse des données métaboliques en période de haute charge d'entraînement a été réalisée et sera présentée dans la suite de ce manuscrit.

Étude : Adaptations énergétiques au statut hormonal ovarien chez les athlètes féminines en haute charge d'entraînement. Résultats de l'étude CAT Women.

ÉTUDE

Adaptations énergétiques au statut hormonal ovarien
chez les athlètes féminines en haute charge
d'entraînement.

Résultats de l'étude CAT Women

OVARIAN HORMONAL STATUS MAY IMPACT EXERCISE BUT NOT RESTING OR POSTPRANDIAL METABOLISM IN HIGH TRAINING LOAD PERIOD ATHLETES.

Running title: Athletes Ovarian Hormonal Status & Metabolism.

Sarah BAGOT^{1,2*}, Bruno PEREIRA³, Elora FOURNIER^{1,2}, Céline GRYSO², Emilie CHANSÉAUME BUSSIÈRE², Frederic DUTHEIL⁴, Jennifer L MILES-CHAN⁵, David THIVEL^{1,6}, Martine DUCLOS^{6,7}, Laurie ISACCO^{1,6}

1. Clermont Auvergne University, UPR 3533, Laboratory of the Metabolic Adaptations to Exercise under Physiological and Pathological Conditions (AME2P), CRNH Auvergne, Clermont-Ferrand, France. sarah.bagot@uca.fr; david.thivel@uca.fr; laurie.isacco@uca.fr; elora.fournier@uca.fr.

2. Nutrifizz, 63000 Clermont-Ferrand, France. celine@nutrifizz.fr; emilie.cb@nutrifizz.fr.

3. Clermont-Ferrand University Hospital, Biostatistics Unit (DRCI), Clermont-Ferrand, France. bpereira@chu-clermontferrand.fr.

4. Université Clermont Auvergne, CNRS, LaPSCo, Physiological and Psychosocial Stress, CHU Clermont-Ferrand, University Hospital of Clermont-Ferrand, Preventive and Occupational Medicine, Witty Fit, F-63000 Clermont-Ferrand, France. fred_dutheil@yahoo.fr.

5. Human Nutrition Unit, School of Biological Sciences, Waipapa Taumata Rau - The University of Auckland, Auckland, New Zealand. j.miles-chan@auckland.ac.nz.

6. International Research Chair Health in Motion, Clermont Auvergne University Foundation, Clermont-Ferrand, France.

7. Department of Sport Medicine and Functional Explorations, CHU Clermont-Ferrand, Clermont-Ferrand, France. mduclos@chu-clermontferrand.fr.

***Corresponding author:** Sarah BAGOT, Clermont Auvergne University, UPR 3533, Laboratory of the Metabolic Adaptations to Exercise under Physiological and Pathological Conditions (AME2P), CRNH Auvergne, Clermont-Ferrand, France. sarah.bagot@uca.fr.

ABSTRACT

While there is an increasing interest in the physiological specificities of females in sport and performance, the ovarian hormonal status impact on energy metabolism remains unexplored in female athletes engaged in a high-training load period. The aim was to explore resting, low-intensity exercise, and postprandial metabolism in function of female athletes' ovarian hormonal status in a high-training load period. Body composition (dual-energy X-ray absorptiometry), energy expenditure and substrate oxidation (resting, low-intensity exercise and postprandial; indirect calorimetry) were assessed among 35 athletes within a high-training load period, during either active hormonal contraceptive use (n=9, HC+), within both follicular (FP) and luteal phases (LP) of the menstrual cycle (n=23, HC-), or with amenorrhea (n=3). Estrogens (E2) and progestin (P4) were quantified by salivary sample. No significant difference was observed in energy expenditure or substrate oxidation at rest or postprandially between HC+, FP, and LP. During exercise, a significantly higher net energy cost in HC+ compared with HC- athletes (vs. FP: $p=0.01$, vs. LP: $p=0.02$) and an increased respiratory quotient in the LP compared to the FP in HC- athletes were observed ($p=0.02$). The E2/P4 ratio was negatively correlated with carbohydrate oxidation at rest ($r=-0.37$, $p=0.03$), after 30min exercising ($r=-0.34$, $p=0.05$) and after 120min in the postprandial state ($r=-0.41$, $p=0.03$). During a phase of high-training load, the ovarian hormonal status of female athletes may impact their energy metabolism during exercise but not at rest nor postprandially, calling for future research to optimize training load and/or recovery strategy.

Key-words: Female, sport, menstrual cycle, hormonal contraceptive, competition, substrates oxidation.

1. INTRODUCTION

Although there is a growing interest in female's sport and exercise physiology, only 35% of the available literature in this area focuses on females, and results obtained in males are most of the time extrapolated to them [1]. However, unlike males, female physiology during their reproductive life is characterized by ovarian hormonal specificities, namely: i) endogenous estrogen (E2) and progesterone (P4) fluctuations across the natural menstrual cycle (dividing the menstrual cycle into follicular and luteal phase (FP and LP, respectively)); ii) the biological activities of exogenous ovarian hormones contained in hormonal contraceptives (HC), used by 40 to 51% of athletes [2]; and/or iii) the hormonal specificities of pregnancy. In addition, the prevalence of menstrual cycle disorders (*e.g.*, luteal insufficiency, polymenorrhea, oligomenorrhea, amenorrhea, *etc.*) is higher in female athletes than in the general population [3], adding to the specificities and heterogeneity of ovarian hormonal status in female athletes, and highlighting thus the difficulty to properly study them. Many female athletes perceive, and have reported, hindered performance due to their ovarian hormonal fluctuations (*e.g.*, across the natural menstrual cycle for females not using HC or during the placebo phase for females using HC) [4]. In their 2022 survey conducted among 1,086 athletes, Ekenros *et al.* [5] revealed that 76% of female athletes consider that their menstrual cycle or the utilization of HC might have a partial or high impact on their performance in training. Over the last few years, there has been growing interest regarding the impact of ovarian hormonal status on athlete health (*e.g.*, risk of injury, menstrual and premenstrual syndromes) and performance (*e.g.*, strength, endurance). Concerning specifically energy metabolism, which has direct and indirect influence on both health and performance, several authors have questioned the effect of the ovarian hormonal fluctuations across the menstrual cycle and/or the utilization of HC on substrate oxidation at rest or during exercise. Related studies however report somewhat inconsistent results, likely due to the complexity of the interaction of E2 and P4 on energy metabolism [6–11]. Regarding the exogenous ovarian hormones contained in HC, some authors, focusing on oral contraceptives (*i.e.*, ethynyl estradiol and progestin), have suggested a greater biological activity of the synthetic ovarian hormones that may override the effect of the endogenous ovarian hormones [12]. For instance, some authors have demonstrated greater lipid oxidation as well as reduced CHO utilization during moderate prolonged exercise in LP compare with FP in eumenorrheic active females [13,14], but other authors have only observed a minimal impact, suggesting that controlling for a female's hormonal status may not be necessary [15,16]. Importantly, the existing literature has raised several issues that need to be considered before firm conclusions can be drawn. Indeed, many studies focus on performance but have only included recreationally, or moderately active females [13,17], likely due to the difficulty to conduct studies within the athlete population. Knowing the subtle physiological adaptations of the latter population group, it is essential to properly consider and standardize all parameters which are likely to influence

energy metabolism. Indeed, athletes experience different training loads across their sport season, that can interact with metabolic adaptations. To the best of our knowledge, no study has explored this relationship or described metabolic responses in function of the ovarian hormonal status and controlled for training load. Nutritional status is also an important factor, modulated by athletes in function of their sporting objectives, that has significant influence on substrate metabolism [18]. Importantly, Isacco *et al.* [19] showed that food ingestion may mask substrates mobilization that can be observed during exercise under fasting conditions in recreationally active females, independent of the use of oral contraceptives. This questions the existence of potential specific metabolic responses to nutritional status, in function of ovarian hormonal status, *via* the measurement of both resting metabolic rate (fasted state) and postprandial metabolism, with the latter being unstudied in the female athlete population. Together, these results clearly highlight the complexity of properly studying the impact of female athlete ovarian hormonal status on energy metabolism, considering the potential interaction effects that may induce environmental or individual parameters, like nutritional or training status. The objective of the present work was thus to determine the effect of ovarian hormonal status (HC use and menstrual cycle phase) on resting, exercise and postprandial energy expenditure and substrate oxidation in female athletes during a high training load period.

2. METHODS

2.1. Participants

Thirty-five French national or international level female athletes practicing team sports (soccer and rugby) in two local clubs volunteered to participate in this cohort follow-up study during the 2021-2022 and 2022-2023 sports seasons. To be eligible, the athletes had to be aged 18 – 40 y, and train at the national or international level. Females with primary or secondary amenorrhea (never had 3 consecutive periods of menstrual cycle or the absence of ≥ 3 consecutive periods in non-pregnant females with past menses, respectively), using HC (HC+), or having a natural menstrual cycle (HC-) which lengths ≥ 21 days and ≤ 38 days [20] for at least 6 months before the beginning of the follow-up were considered in the present study. Pregnant or breastfeeding females were excluded. All experiments were conducted in accordance with the Declaration of Helsinki and written informed consents were obtained from all the athletes. The study protocol was approved by the relevant ethical authorities (2019-A00699-48).

2.2. Study design

The general protocol of the study is illustrated in **Figure 1**. After a screening visit, each athlete came to the laboratory once (HC+ athletes in the active phase of their hormonal contraceptive use and athletes

with amenorrhea) or twice (HC- athletes; one visit in the FP and one in the LP) during a high training load period of their sport season, planned and reported by their coach in strength and conditioning. For the HC- athletes, the order of the visits was individualized according to their personal menstrual cycle, as described below.

All visits were identical with participants joining the laboratory in the morning after a 12-hour overnight fast. Anthropometric and body composition measurements were taken prior to a 20-minute resting cardiometabolic (REST) measurement. Saliva samples were then taken to determine the athletes' salivary ovarian hormone concentration (E2 and P4). Participants were then asked to perform a low intensity walking exercise on a treadmill (EX; 30 min at 4 km.h⁻¹) with continuous cardiometabolic measurement. Participants then completed the Three-Factor Eating Questionnaire (TFEQ-r21). A calibrated breakfast was then served, which participants were requested to eat within 15-20 min, before starting a 2-hour measurement of post-lunch energy and expenditure (PPRAND) and cardiometabolic parameters. At the end of each visit, participants were given a food record to complete over the 3 subsequent days.

2.1.1 Ovarian hormonal status

First, the participants completed the self-administered Answ'Her questionnaire focusing on their ovarian hormonal status (to determine their hormonal contraceptive history and the typical menstrual cycle length over at least three cycles) [21]. All HC+ participants were using oral contraceptives (none of the participants used other types of hormonal contraceptives), either a progestin-only or low-dose combined (estroprogestins) monophasic pill. Participants then systematically informed the research investigator of the days of their HC use (HC+ participants) or of the first day of their menses (HC- participants) throughout their participation in the study protocol. Study visits were planned in active HC phase for the HC+ participants (*i.e.*, while consuming hormone-containing pills as opposed to placebo), or during the FP and LP for the HC- participants. Theoretical ovulation was estimated as the mean menstrual cycle length *minus* 14 days (± 2 days). Subsequently, the FP visit was planned between the end of menses and 2 days before theoretical ovulation, and the LP visit was planned between 2 days after theoretical ovulation and 2 days before the next menses. If the following menses did not occur during the targeted period, the visits were rescheduled. Twelve of the HC- participants started the protocol in the FP, and the remaining participants in the LP (n=11). The E2 and P4 salivary concentrations were performed *a posteriori* to confirm ovarian hormonal status.

2.2.2. Salivary samples

Fasting drool salivary samples (1.5 mL) were collected, without prior toothpaste brushing, and immediately frozen at -80°C. Salivary 17β-estradiol (E2) and progesterone (P4) were quantified by high-sensitivity enzyme immunoassay kits (ELISA, Salimetrics®, State College, PA 16803). The E2/P4 ratio was calculated as the quotient of 17β-estradiol (pmol.l⁻¹) to progesterone (nmol.l⁻¹).

2.2.3. Training load

The nature, volume and intensity of participant training was determined by the team strength and conditioning coach, according to the sport season training plan, and provided to the research investigators. The present protocol was performed during the high-training load period, with the final preparation stage (*i.e.*, national championship) for each participant/team. This training period was chosen to represent daily energy expenditure in the run-up to major competitive events.

2.2.4. Anthropometry and body composition

At each study visit, fasting body weight and height were measured to the nearest 0.1 kg with a digital scale and to the nearest 0.1 cm using a wall-mounted stadiometer, respectively. Body mass index (BMI) was calculated as body weight (kg) divided by height squared (m²). Body composition (*i.e.*, fat mass (FM), fat-free mass (FFM)) and bone mineral content and density were determined using dual x-ray absorptiometry (DXA, QDR4500A scanner, Hologic, Waltham, MA, USA) and hydration level was assessed *via* multi-frequency bioelectrical impedance (Tanita MC-780 Tanita Corporation, Tokyo, Japan).

2.2.5. Calibrated breakfast

The standardized and balanced breakfast consisted of slices of whole meal bread, soft butter, sliced chicken breast, soft white cheese and green kiwifruit. Participants were given 15-20 min to eat it entirely. Breakfast content was calibrated to provide 25% of recommended daily energy intake [22] for athletes using the Black *et al.* [23] equation: $Recommended\ energy\ intake\ (kcal.d^{-1}) = 23 \times BW^{0.48} \times height^{0.5} \times age^{-0.13} \times 1.725$. Macronutrients content was also calibrated proportionally to align with percentage of recommended energy intake: 50 ± 2% carbohydrate (CHO), 35 ± 2% lipid and 15 ± 1% protein.

2.2.6. Appetite sensations and satiety quotient

Appetite sensations were assessed using visual analog scales (VAS) before, and 0, 30, 45 and 60 min after the calibrated breakfast. Four questions were asked to evaluate hunger (“How hungry do you feel?”), fullness (“How full do you feel?”), desire to eat (“How strong is your desire to eat?”) and prospective food consumption (“How much do you think you could eat?”), from “not at all”

(0/100 mm) to “extremely” (100/100 mm). Developed by Green *et al.* [24], the satiety quotient was used as an indicator of the satiating efficiency of food. The satiety quotient was calculated by dividing the change in subjective appetite sensations in response to the breakfast by its energy content.

2.2.7. Three-Factor Eating Questionnaire

The French version of the 21-item Three-Factor Eating Questionnaire was used to assess eating behavior considering the factors of cognitive restraint, emotional eating and uncontrolled eating [25]. This questionnaire covers the following 3 aspects of eating behaviour: overall cognitive restraint (6 items), emotional eating (6 items) and uncontrolled eating (9 items). The items are assessed on 4-point scales (1—definitely true; 2—mostly true; 3—mostly false; or 4—definitely false). A score between 1 and 4 is attributed to each answer. The higher the sum of these scores per factor, the greater the cognitive restraint, emotional eating and uncontrolled eating.

2.2.8. Subjective dietary intake assessment

After each study visit, participants were asked to complete a hard-copy 72h-food record in free-living conditions, with as much detail as possible related to the nature and quantity of every food and drink consumed. If it was not possible to weigh food or drink, participants were provided with validated reference images from the SUVIMAX study [26] to estimate portion size and weight. Total energy and macronutrient intake (absolute and relative) were calculated using a nutrition software (Nutrilog Europe Society, Marans, France; Version 3.20).

2.2.9. Resting, exercising and postprandial cardiometabolic assessments

Continuous cardiometabolic measurements were performed under 3 distinct, consecutive conditions during each study visit: (i) at rest, after an overnight fast of at least 12 hours, in a semi-supine position for 20 minutes under standardized ambient conditions (quiet room with a thermal comfort between 19 to 21°C, and relative humidity of 50%) (REST); (ii) in the fasted state (*i.e.*, for at least 12 hours), during 30 min of treadmill walking exercise at 4 km.h⁻¹ (EX); and (iii) at rest in a semi-supine position, for 2 hours commencing immediately after consumption of the calibrated breakfast, while watching a neutral film to limit weariness and boredom (PPRAND).

Indirect calorimetry with a facemask (MetaMax 3b, Cortex Biophysik, Leipzig, Germany) was used to continuously measure oxygen consumption (VO₂) and dioxide production (VCO₂) during the three conditions, with the equipment calibrated according to the manufacturer’s recommendations prior to each session. Respiratory quotient (RQ) was calculated as VCO₂/VO₂ and energy expenditure (kcal.min⁻¹) as VO₂ x energy equivalent of oxygen [27]. CHO and lipid oxidation rates were calculated according to the following equations from [28]: $CHO (mg.min^{-1}) = 4.585 VCO_2 (ml.min^{-1}) -$

$3.2255 VO_2(ml.min^{-1})$ and $Lipid(mg.min^{-1}) = 1.6946 VO_2(ml.min^{-1}) - 1.7012 VCO_2(ml.min^{-1})$.

Gross and net energetic cost (EC) of exercise were calculated using the following equations:

$$Gross\ EC\ (ml.m^{-1}) = \frac{VO_2\ EX(ml.min^{-1})}{speed\ (m.min^{-1})} \text{ and } Net\ EC\ (ml.m^{-1}) = \frac{VO_2\ EX(ml.min^{-1}) - VO_2\ REST(ml.min^{-1})}{speed\ (m.min^{-1})}.$$

Energy expenditure, energetic cost, CHO and lipid oxidation rates were expressed in absolute and relative to body weight and FFM values. Calculations were performed over a 5-min steady state for REST, and on a 2-min steady state period during each time point of interest for EX and PPRAND (*i.e.*, 0-10, 11-20 and 21-30 min for EX; and 0-15, 16-30, 31-45, 46-60, 61-90 and 91-120 min for PPRAND).

Heart rate was continuously measured throughout the protocol by a wireless physiological monitoring system (Polar V800, Polar, Kempele, Finland) and mean heart rate was calculated according to the same time periods.

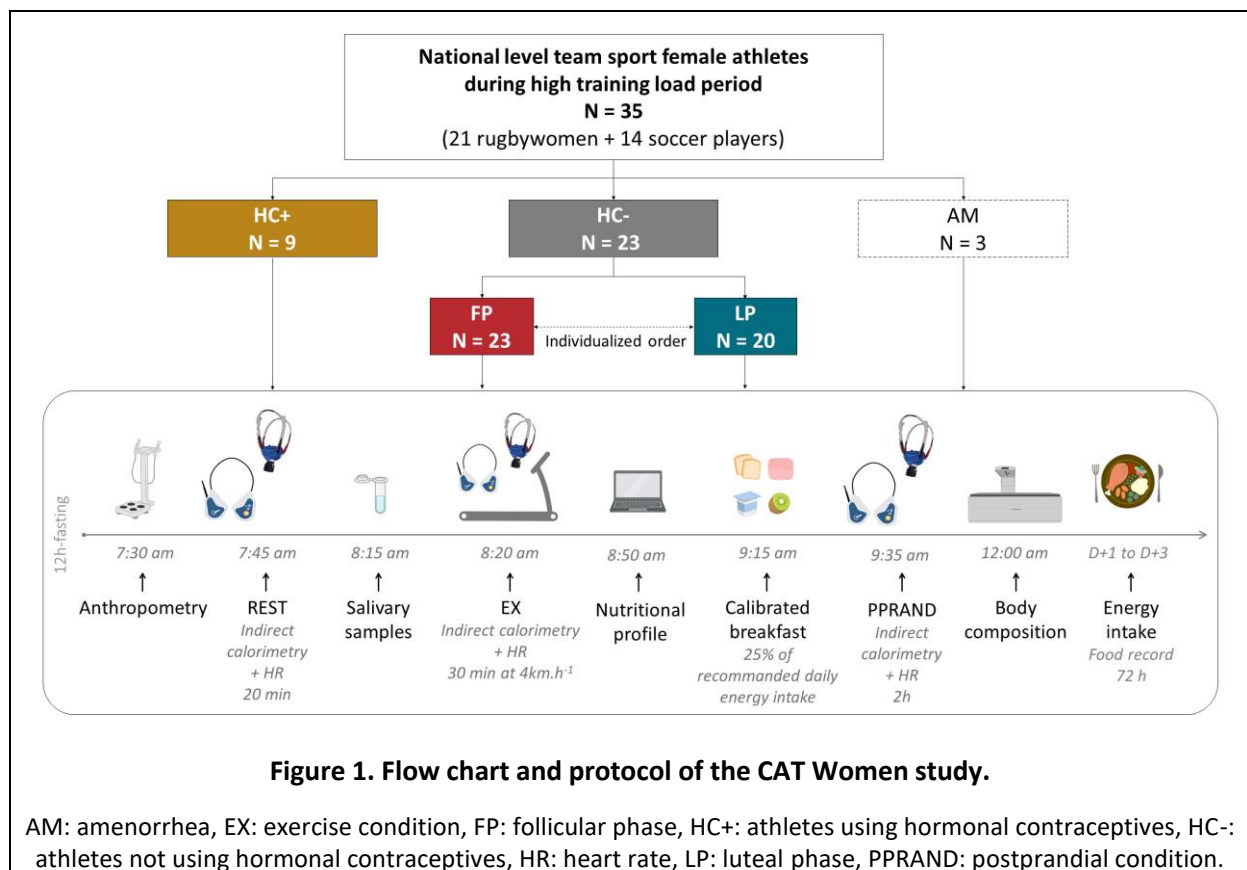
2.3. Statistical analysis

Continuous data are presented as mean and standard deviation (sd). The assumption of normality was checked using the Shapiro-Wilk test. Random-effects models (*i.e.*, linear mixed models) were carried out to examine group (HC+ and HC-), condition (FP and LP), time-point (exercising and postprandial) effects, and their interactions, considering between and within-participant variability. Subject was considered as random-effect. The normality of residuals was studied as aforementioned. Logarithmic transformation was performed to achieve normality when appropriate. For non-repeated comparisons, either ANOVA or Kruskal-Wallis tests were performed according to ANOVA assumptions. When appropriate (omnibus p-value less than 0.05), Tukey-Kramer or Games and Howell post hoc tests were respectively used to analyse pairwise comparisons. To better consider the potential impact of these parameters on metabolic responses, statistical results adjusted for BMI (p_{BMI}) and %FM (p_{FM}) were also established. Areas-under-the-curve (AUC) were calculated for EX and PPRAND conditions using the trapezoidal method. Correlation coefficients (noted r , Spearman according to statistical distribution) were estimated to study the relationship between continuous variables, such as relationships between the E2/P4 ratio and resting, exercising, or postprandial RQ. These analyses were carried for all HC- participants. Results are described as “HC effect” for HC versus FP and/or LP, and as “menstrual cycle effect” for FP versus LP comparisons. Stata statistical software (version 15, StataCorp, College Station, USA) was used to carry out the statistical analyses. The tests were two-sided, with a type-I error set at 5%. A Sidak’s type I error correction was applied to take into account multiple comparisons.

3. RESULTS

3.1. Participants

Among the 35 female athletes, 23 were HC-, 9 were HC+ and 3 were amenorrhoeic (AM) (**Figure 1**). Twenty HC- athletes completed the two visits (*i.e.*, FP and LP) and 3 only completed the visit in the FP due to schedule incompatibility. All the HC+ athletes were using oral contraceptives (6 combined and 3 progestin-only pills). Participants' characteristics are presented in **Table 1** and in **Supplementary file 1**.



3.2. General characteristics

3.2.1. Ovarian hormonal status

The mean length of the menstrual cycle in the HC- athletes' group was 30.5 ± 4.8 days. FP visit took place at the day 10.2 ± 3.1 after the first day of menses and the LP visit at the day 24.9 ± 3.9 . The salivary concentrations of 17β -estradiol and progesterone were significantly different between phases (FP: E2: 3.71 ± 1.36 pmol.l⁻¹; P4: 0.26 ± 0.23 nmol.l⁻¹ and LP: E2: 4.74 ± 1.69 pmol.l⁻¹; P4: 0.86 ± 0.70 nmol.l⁻¹; E2: $p = 0.01$; P4: $p < 0.001$) and within the normal range for both phases. The E2/P4 ratio was significantly higher in FP than LP (**Table 1**). E2 and P4 salivary concentrations in HC+ group were within

physiological range and respectively of 3.74 ± 2.49 pmol.l⁻¹ (vs. FP: $p = 0.57$; vs. LP: $p = 0.29$) and 0.16 ± 0.05 nmol.l⁻¹ (vs. FP: $p = 0.29$; vs. LP: $p = 0.03$).

Table 1. General characteristics of the athletes.

	HC+ n = 9	HC-		p-value
		FP n = 23	LP n = 20	
Age (years)	23.2 ± 2.9	22.7 ± 3.2	22.7 ± 3.4	0.70
Ovarian hormonal status				
Menstrual cycle length	30.5 ± 4.8			
Day of visit (from first day of menses)		10.2 ± 3.1	24.9 ± 3.9	
E2 (pmol.l ⁻¹)	3.74 ± 2.49	3.71 ± 1.36 ^{°°}	4.74 ± 1.69	0.04
P4 (nmol.l ⁻¹)	0.16 ± 0.05 ^{°°}	0.26 ± 0.23 ^{°°°}	0.86 ± 0.70	<0.001
E2/P4 (pmol.l ⁻¹ /nmol.l ⁻¹)	24.6 ± 15.3 ^{°°}	19.1 ± 10.4 ^{°°°}	8.3 ± 6.1	<0.001
Anthropometry and body composition				
BMI (kg.m ⁻²)	28.5 ± 6.2	24.9 ± 2.9*	25.1 ± 2.9*	0.03
Height (cm)	167.3 ± 6.9	167.7 ± 5.9	168.1 ± 6.1	0.88
Weight (kg)	80.5 ± 21.9	70.3 ± 10.8	71.0 ± 11.2	0.10
FM (%)	25.1 ± 5.7	21.0 ± 3.7*	21.1 ± 4.3*	0.04
Android FM (%)	25.0 ± 7.9	18.2 ± 4.1 ^{***}	17.7 ± 4.2 ^{***}	0.004
Gynoid FM (%)	29.1 ± 4.9	26.2 ± 4.4	25.5 ± 4.1	0.15
FFM (kg)	57.1 ± 12.9	52.8 ± 7.0	53.5 ± 7.6	0.45
BMC (kg)	2.79 ± 0.36	2.59 ± 0.30	2.61 ± 0.30	0.17
BMD (g.cm ⁻²)	1.34 ± 0.10	1.27 ± 0.06*	1.28 ± 0.06*	0.04
TBW (%)	50.9 ± 6.0	53.5 ± 2.9	54.2 ± 2.9	0.09
Nutritional profile				
<i>TFEQ</i>				
Uncontrolled Eating	2.40 ± 0.74	2.17 ± 0.65	2.17 ± 0.60	0.24
Cognitive Restraint	2.33 ± 0.70	1.92 ± 0.43	2.18 ± 0.71	0.76
External Eating	2.19 ± 0.83	2.10 ± 0.65	2.09 ± 0.60	0.43
<i>Food intake</i>				
EI (kcal/d)	1815.3 ± 174.2	1826.7 ± 445.2	1779.6 ± 360.8	0.93
CHO (g, %EI)	192.2 ± 40.3 (42.6 ± 8.8%)	204.3 ± 73.1 (44.1 ± 8.5%)	199.3 ± 56.5 (44.3 ± 5.1%)	0.87 0.88
Lipid (g, %EI)	71.9 ± 17.9 (35.7 ± 8.6%)	72.4 ± 21.2 (36.0 ± 6.6%)	66.7 ± 13.2 (34.3 ± 5.8%)	0.64 0.72
Protein (g, %EI)	74.3 ± 12.1 (16.3 ± 1.6%)	75.9 ± 19.5 (16.9 ± 3.5%)	74.7 ± 17.2 (17.2 ± 4.4%)	0.98 0.72

BMI: body mass index, CHO: carbohydrates, BMC: bone mineral content, BMD: bone mineral density, E2: estrogens, EI: energy intake, FFM: fat-free mass, FM: fat mass, FP: follicular phase, HC+: athletes using hormonal contraceptive, HC-: athletes not using hormonal contraceptive, LP: luteal phase, P4: progesterone, TBW: total body water, TFEQ: three-factor eating questionnaire.

Results are presented as mean ± sd.

Significant differences with HC+ group: * $p \leq 0.05$, *** $p \leq 0.001$.

Significant differences with LP group: °° $p \leq 0.01$, °°° $p \leq 0.001$.

3.2.2. Anthropometry and body composition

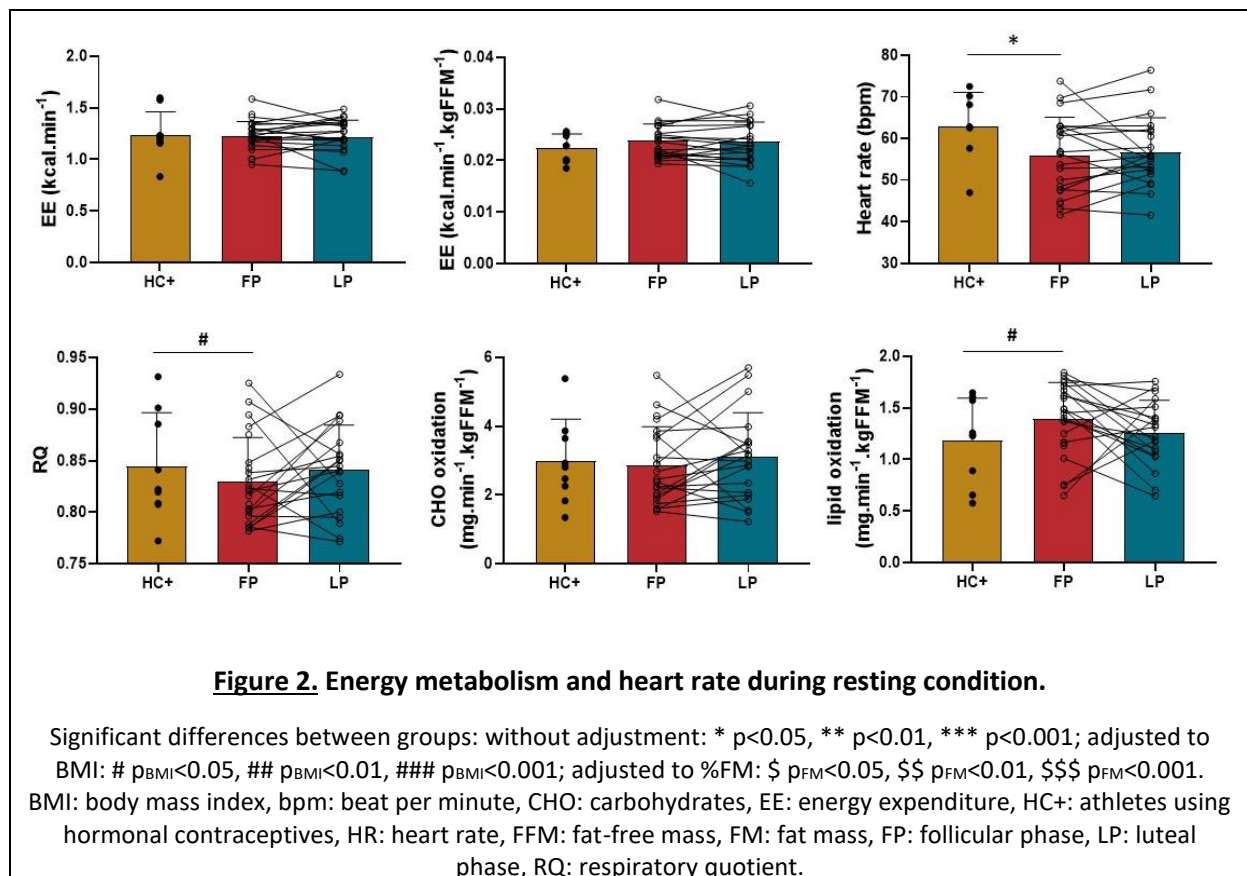
A significantly higher BMI and bone mineral density were observed in HC+ than HC- athletes. HC+ also had a higher total FM (vs. FP: $p = 0.01$; vs. LP: $p = 0.02$) and abdominal FM (vs. FP: $p = 0.001$; vs. LP: $p = 0.001$) than HC- athletes in both menstrual cycle phases.

3.2.3. Dietary profile and food intake

No ovarian hormonal status (HC use or menstrual cycle) effect was observed on any TFEQ score. Mean daily energy and macronutrient intake was similar between groups and phases.

3.3. Resting energy metabolism and heart rate

As illustrated in **Figure 2**, no HC use or menstrual cycle effect was observed in absolute or relative energy expenditure, or substrate oxidation rates at rest. When adjusted for BMI, HC+ group had a significantly higher RQ and a lower absolute lipid oxidation than HC- athletes in FP (0.84 ± 0.05 vs. 0.83 ± 0.04 ; $p_{\text{BMI}} = 0.03$, respectively; $68.4 \pm 31.2 \text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$ vs. $72.7 \pm 19.9 \text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$; $p_{\text{BMI}} = 0.02$, respectively). Results remained non-significant when adjusted for %FM. A significantly higher resting heart rate was observed in HC+ than in HC- in FP ($p = 0.04$) but not in LP ($p = 0.06$), but this significant difference disappeared when adjusted for BMI and %FM.



3.4. Energy metabolism and heart rate during exercise

As shown in **Figure 3**, no significant HC use effect was observed in the metabolic responses to EX except a significant higher absolute energy expenditure in HC+ athletes adjusted for %FM (HC+: 4.18 ± 1.08 kcal.min⁻¹; vs. FP: $p_{\text{FM}}=0.02$; vs. LP: $p_{\text{FM}}=0.04$). While no significant differences were observed for gross EC relative to FFM, HC+ showed a higher net EC relative to FFM than HC-, both in FP ($p = 0.03$, $p_{\text{FM}} = 0.01$) and in LP ($p = 0.06$, $p_{\text{FM}} = 0.02$). Regarding the menstrual cycle effect, similar absolute and relative energy expenditure between FP and LP was observed (FP: 3.70 ± 0.42 kcal.min⁻¹; LP: 3.79 ± 0.45 kcal.min⁻¹; $p_{\text{FM}} = 0.008$), while significantly higher RQ (FP: 0.81 ± 0.03 ; LP: 0.82 ± 0.03 ; $p = 0.02$), absolute and relative-to-FFM CHO oxidation (FP: 7.10 ± 2.24 mg.min⁻¹.kgFFM⁻¹; vs. LP: 7.83 ± 2.46 mg.min⁻¹.kgFFM⁻¹; $p = 0.001$), and significantly lower absolute and relative-to-FFM lipid oxidation (FP: 4.70 ± 0.91 mg.min⁻¹.kgFFM⁻¹; vs. LP: 4.45 ± 0.95 mg.min⁻¹.kgFFM⁻¹; $p = 0.005$) were observed in LP compared with FP. Similar results were obtained when RQ, CHO and lipid oxidation rates were adjusted for BMI or %FM. However, no differences were observed between menstrual cycle phases for gross ($p = 0.88$, $p_{\text{BMI}} = 0.90$, $p_{\text{FM}} = 0.55$) or net EC relative to FFM ($p = 0.38$, $p_{\text{BMI}} = 0.42$, $p_{\text{FM}} = 0.17$). On average, heart rate was higher in HC+ than HC- during EX without adjustment (vs. FP: $p = 0.05$; vs. LP: $p = 0.04$) and when adjusted for %FM only (vs. FP: $p = 0.05$; vs. LP: $p = 0.05$). AUC with individual responses during EX are presented in **Supplementary file 1a**.

3.5. Energy metabolism, heart rate and satiety quotient in postprandial condition

When adjusted for BMI, HC+ group had significant higher RQ (vs. FP: $p_{\text{BMI}} = 0.01$; vs. LP: $p_{\text{BMI}} = 0.04$) and CHO oxidation (vs. FP: $p_{\text{BMI}} = 0.02$; vs. LP: $p_{\text{BMI}} = 0.02$) than HC- group, whatever the menstrual cycle phase. No other significant differences in energy metabolism were observed in the PPRAND condition (**Figure 4**). Although not statistically significant, HC+ showed a tendency toward higher postprandial heart rates than HC- (HC+ vs. FP: $p = 0.06$, HC+ vs. LP: $p = 0.07$). Within the HC- group, a higher satiety quotient for perspective of food consumption was observed in LP than in FP (FP: 7.9 ± 4.0 ; LP: 9.1 ± 3.7 ; $p = 0.02$), but no other significant differences were observed for visual analog scales or satiety quotients (data not shown). AUC with individual responses during PPRAND are presented in **Supplementary file 1b**.

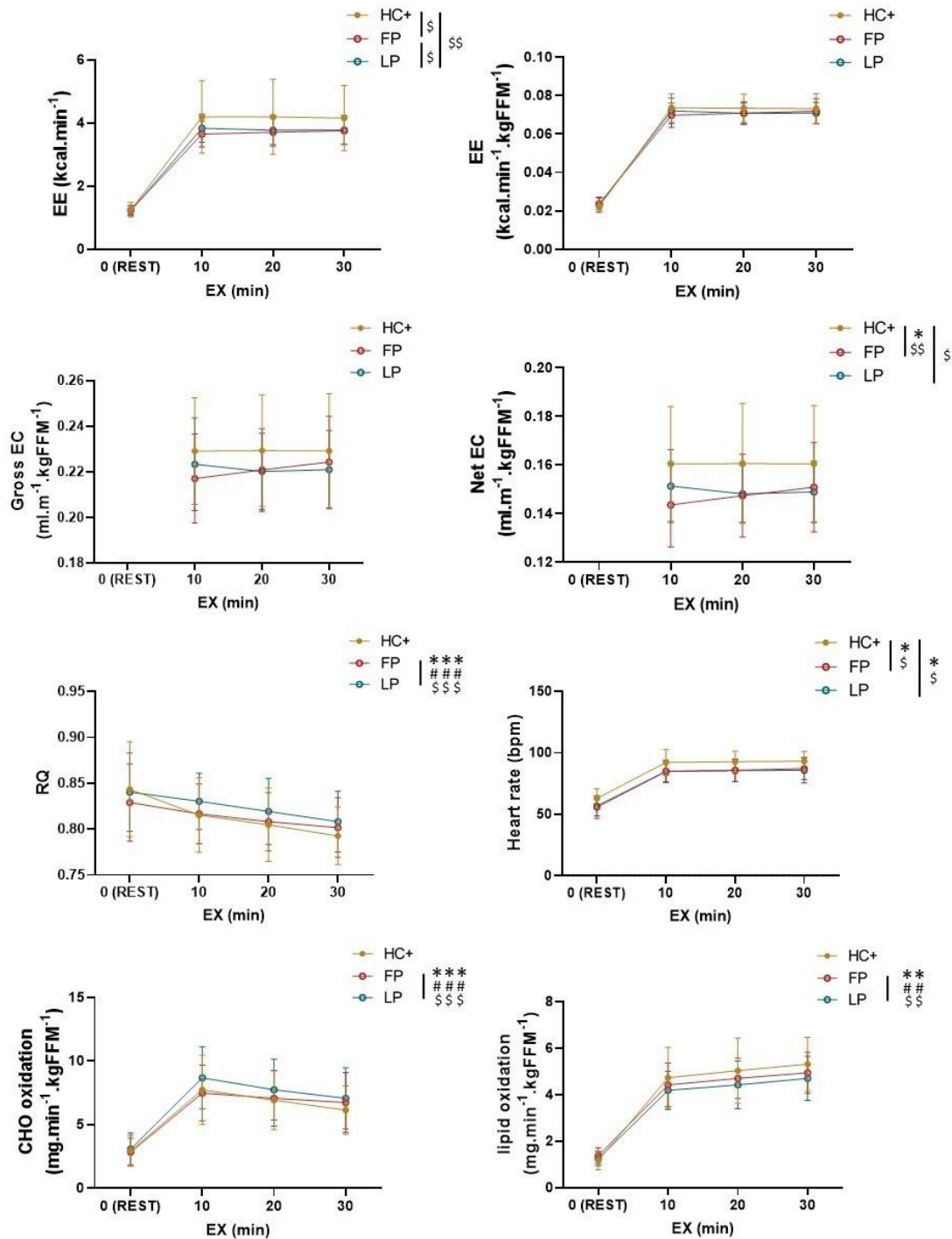
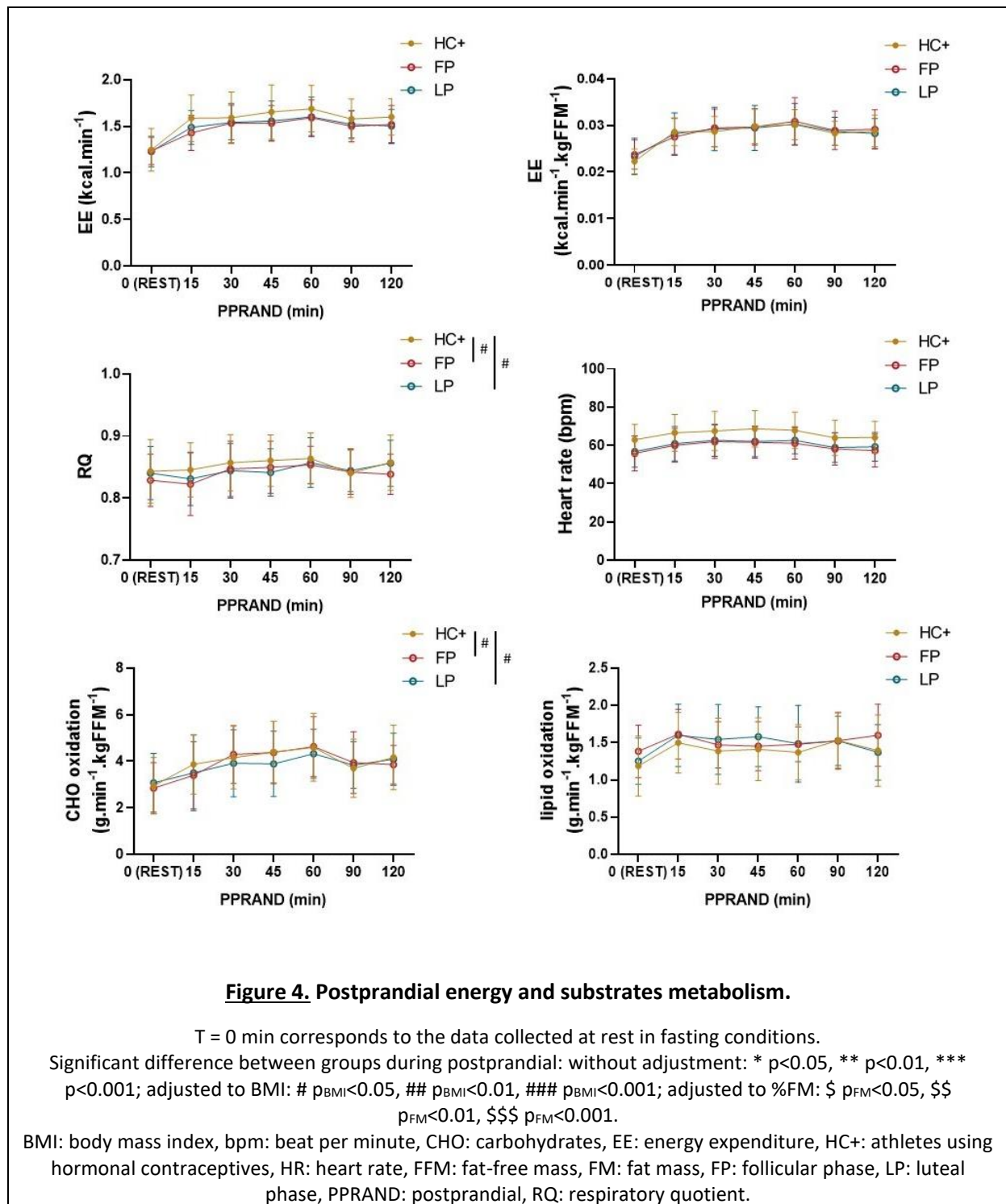


Figure 3. Energy metabolism and heart rate during exercise.

T = 0 min corresponds to the data collected at rest in fasting conditions.

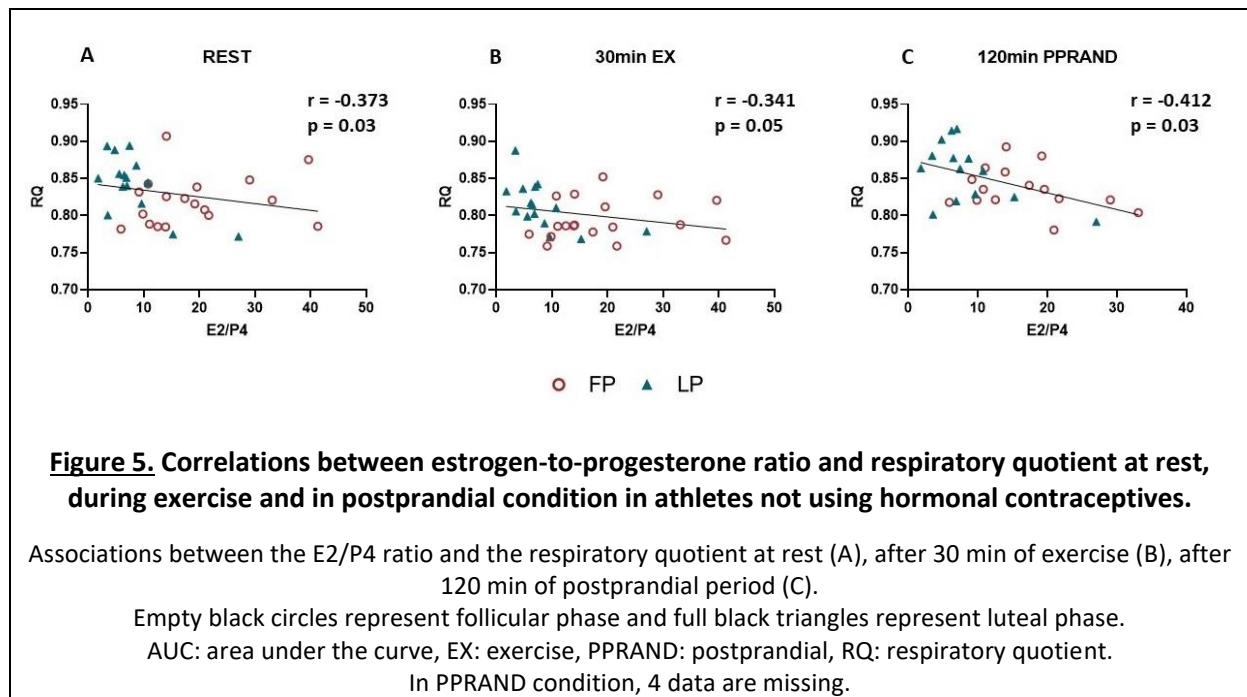
Significant differences between groups at exercise: without adjustment: * p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001; adjusted to BMI: # p_{BMI}<0.05, ## p_{BMI}<0.01, ### p_{BMI}<0.001; adjusted to %FM: \$ p_{FM}<0.05, \$\$ p_{FM}<0.01, \$\$\$ p_{FM}<0.001.

BMI: body mass index, bpm: beat per minute, CHO: carbohydrates, EC: energetic cost, EE: energy expenditure, EX: exercise, HC+: athletes using hormonal contraceptives, HR: heart rate, FFM: fat-free mass, FM: fat mass, FP: follicular phase, LP: luteal phase, RQ: respiratory quotient.



3.6. E2/P4 ratio and energy metabolism associations

As shown in **Figure 5**, the E2/P4 ratio in HC- athletes was negatively correlated with RQ at rest ($r = -0.373$, $p = 0.03$), after 30 min of EX ($r = -0.341$, $p = 0.05$) and after 120 min of PPRAND ($r = -0.412$, $p = 0.03$).



3.7. Hormonal status profile, energy metabolism and heart rate in athletes with amenorrhea

Due to the small sample size of AM athletes, no statistical comparison between AM and HC+ or HC- groups were conducted. Nevertheless, data about the three AM athletes are presented in **Supplementary file 2** for completeness. Mean E2 and P4 concentrations were $2.78 \pm 0.97 \text{ pmol.l}^{-1}$ and $0.17 \pm 0.13 \text{ nmol.l}^{-1}$, respectively. The three subjects were soccer players and presented a BMI between 19.7 and 25.5 kg.m^{-2} with a mean FM of $14.9 \pm 4.4\%$. Daily food intake was of $2402 \pm 251 \text{ kcal}$ ($52.0 \pm 6.2\%$ CHO, $21.9 \pm 2.0\%$ lipid, $21.1 \pm 6.0\%$ protein) (**Supplementary file 2.a**).

At rest, AM athletes had an absolute energy expenditure of $1.12 \pm 0.08 \text{ kcal.min}^{-1}$ with a RQ of 0.85 ± 0.04 and a mean heart rate of $53.3 \pm 4.2 \text{ bpm}$. During EX, mean energy expenditure and heart rate increased up to $3.00 \pm 0.25 \text{ kcal.min}^{-1}$ and $74.7 \pm 3.5 \text{ bpm}$, respectively, while RQ decreased to 0.83 ± 0.03 (**Supplementary file 2.b**). In PPRAND, mean energy expenditure was of $1.43 \pm 0.17 \text{ kcal.min}^{-1}$ with a RQ of 0.88 ± 0.03 and a mean heart rate of $59.5 \pm 4.9 \text{ bpm}$ (**Supplementary file 2.c**).

4. DISCUSSION

To our knowledge, this study is the first to investigate the potential effects of ovarian hormonal status on the three main energy expenditure compartments (rest, exercise, postprandial) in the same cohort of national-level female athletes during a high training load period. According to our results, there does not appear to be any significant impact of HC nor menstrual cycle phase on energy metabolism at rest and in postprandial condition. However, a significantly higher net energy cost during low intensity exercise in HC+ compared with HC- athletes, and increased CHO oxidation in the LP compared to the FP during low intensity exercise in HC- athletes were observed.

Importantly, although the observed absence of weight and body composition difference across a single menstrual cycle appears in line with existing evidence [29–31], the HC+ athletes within the present study exhibited a higher body weight than HC-, with a higher FM. However, these HC+ individuals are those occupying sports positions where a higher body weight presents a performance advantage (7 rugby players, including 4 in the positions of blindside flanker, lock, and prop), while the HC- group was composed of 9 soccer players and 14 rugby players in less physically demanding positions (hooker, wing, openside flanker, center), which may explain the observed differences. Therefore, to account for potential effects related to differences in body composition, analyses were conducted with and without adjustment for BMI and %FM.

4.1. Hormonal contraceptive effect on energy metabolism

The present findings suggest, for the first time in national-level team sport athletes, that the use of HC does not impact energy expenditure and substrate oxidation at rest or during low intensity exercise, in line with what has been previously observed in both inactive and active (*i.e.*, recreational to college-level) females [19,32–35]. Indeed, most of the studies investigating the effect of HC use on substrate metabolism during exercise have not shown any difference in lipid oxidation, despite a greater lipid mobilization in HC+ than in HC- [19,36–40]. However, by determining the individual exercise intensity at which lipid oxidation is maximal, Isacco *et al.* [41] observed that HC+ females had a higher maximal lipid oxidation rate, achieved at a higher exercise intensity, than HC- females, highlighting the interaction of exercise intensity and hormonal status on lipid utilization. As such, in the present protocol, an exercise favoring lipid oxidation (prolonged low intensity bout of walking in the fasted state) was thus utilized. The non-significant difference in lipid oxidation between HC+ and HC- here questions whether the effect of hormonal status on substrate oxidation only exists for the range of exercise intensities that favors maximal oxidation rates, and which were unlikely been achieved here, particularly within the HC+ group. Additional research in athletes across broader range of exercise intensities are thus needed to gain a more comprehensive insight. Interestingly, although HC- and HC+

athletes did not differ in terms of substrate usage profile at a similar energy expenditure at rest or during exercise, a higher net energy cost of walking was observed in HC+ athletes compared to HC-, which, to our knowledge, has never been studied or observed in athletes before. These results suggest a decreased energy efficiency (*i.e.*, “energy spender” profile) in HC+ athletes, even for a very low energy demanding exercise in line with those of everyday life. While further studies are needed to confirm this finding, across various exercise intensities, and to decipher the underlying mechanisms by which synthetic ovarian hormones may influence energy cost (*e.g.*, mitochondrial respiration, oxidative stress at the skeletal muscle level) [42], such an energetic profile discrepancy between HC+ and HC- athletes may indicate that specific training loads and/or recovery strategies should be proposed in function of hormonal status, in order to optimize training adaptations.

Interestingly, while some studies have explored the effect of HC use on energy and substrate metabolism during exercise when performed after meal ingestion [19,37,43,44], the present work appears to be the first to assess its potential effect on female athletes’ postprandial resting metabolism (up to 120 post-meal). Although not using indirect calorimetry, Isacco *et al.* [39] highlighted higher postprandial glycerol and free fatty acid concentrations in HC+ than HC (in response to a calibrated breakfast of 10 kcal.kg body weight⁻¹: 50% CHO, 35% lipid and 15% protein) in 21 recreationally-active females, suggesting a greater lipid mobilization induced by HC use under these conditions. However, exercise *per se* (45 min cycling at 65% VO_{2max}) masked oral contraceptive use-induced postprandial lipid mobilization, and no HC effect was observed on substrate oxidation rates during exercise, either in fast or fed state, in the same cohort of recreationally-active females. Thus, although our study did not assess the mobilization of substrates, any difference in postprandial substrate oxidation was observed between HC+ and HC- athletes. While some authors have questioned the specific nutritional recommendations for female athletes [19], within the present study, there does not appear to be any difference in postprandial energy metabolism in response to a calibrated meal in function of hormonal status.

4.2. Menstrual cycle effect on energy metabolism

According to previous studies [16,45–48], our results suggest an absence of energy expenditure or substrate use differences between the menstrual cycle phases at rest in both fasting and postprandial conditions. For instance, Vaiksaar *et al.* [46] found no difference in substrate oxidation rates between FP and LP at rest in 11 endurance-trained athletes during their high training period. However, a recent meta-analysis by Benton *et al.* [48] suggests a slight, but significantly higher resting energy expenditure in the LP compared to the FP in both active and non-active females. It must be noted however that the authors reported low quality of the overall available evidence, which was then considered as a potential bias and barrier to any firm conclusion [49]. While some studies have assessed the

postprandial resting metabolism in females, none of them have included female athletes [50,51]. In line with our findings, Melanson *et al.* [50] also reported an absence of menstrual cycle phase effect on postprandial resting metabolism following 4 meals differing in energy content (0, 250, 500 and 990 kcal) in young non-athlete, normally menstruating females. Even 3h after a standardized CHO-rich breakfast (308 kcal: 75% CHO, 16% protein, and 9% lipid), Suh *et al.* [51] reported that the menstrual cycle phases did not appear to alter glucose flux at rest in moderately active females, highlighting that nutritional status may have a larger effect on glucose kinetics than ovarian hormone fluctuations. Surprisingly, our results indicate a greater CHO oxidation and lower lipid oxidation in the LP compared to the FP during the low intensity exercise. These results contrast with previous studies suggesting no impact of the menstrual cycle on substrate utilization [46,48,51–53] or lower CHO oxidation in LP compared to FP in physically active females during submaximal exercise (50 min to 2 h exercise, $\leq 70\%$ VO_{2max}) [8,14,54,55]. However, this apparent inconsistency between studies may be related to the modality of exercise, and in particular its duration and intensity. Indeed, some authors have suggested that intensive exercise ($>75\%$ VO_{2max}) may indeed mask variations in substrate metabolism between menstrual cycle phases [7,14,56]. In our protocol, a low intensity walking bout (30 min at 4 km.h⁻¹ walk), under fasting conditions, was performed to favour lipid oxidation [57,58], and this context may therefore at least partly explain the discrepancies with other literature. For example, Vaiksaar *et al.* [46] did not observe any effect of menstrual cycle phase on substrate oxidation during a 1-hour rowing exercise, at 70% VO_{2max} in fed condition, in HC- athletes during their preparatory period for the competitive rowing season. In contrast, Campbell *et al.* [54] observed a greater CHO utilization in FP than in LP in endurance-trained athletes performing a 2-hour 70% VO_{2max} fasted cycling exercise, with no control of the training load period of the athletes. Thus, it could suggest presence of an interactive effect of training load and exercise modality on substrate oxidation in function of menstrual cycle phase, that should be investigated in future studies. Importantly, even if visits were performed in FP and LP in the present study, which has been confirmed by salivary analyses within the normal range [59–61], it is highly difficult to target a precise sub-phase within each phase of the menstrual cycle (namely early, middle or late FP or LP, respectively) under ecological conditions due to large inter and intra individual variability. Athletes in the present study may have been in different sub-phases, as suggested by standard deviation values, with thus specific ovarian hormone concentrations even in the same phase (FP or LP). Knowing the independent and interaction influence of E2 and P4 concentrations on substrate storage, mobilization and utilization, the reported discrepancies between studies may be partly explained by the ovarian hormone profiles specific to each cycle sub-phase. Indeed, higher concentrations of E2 occur at the end of FP and in the middle of LP compared to the beginning of FP or late LP, contributing to glycogen storage and sparing, as well as increased lipid utilization during exercise [7,56]. Moreover, the interaction between E2 and P4 may exert a greater

influence on physiological and psychological variations than the independent fluctuations of a single hormone in isolation. D'Eon *et al.* [62] created three different ovarian hormonal conditions (using pharmacological agents) in eight females: low E2 and P4, high E2 and low P4, and high E2 and P4. Three hours after a standardized breakfast (35% daily energy requirements: 55% CHO, 30% lipid and 15% protein), under conditions with both low E2 and P4 and with high E2 and P4 participants exhibited higher CHO oxidation rates during 60 min of submaximal exercise ($\sim 50\% \text{VO}_{2\text{max}}$) than during the condition with high E2 only. In this context, several authors have proposed that the E2/P4 ratio may be a significant hormonal parameter to consider when studying menstrual cycle, which may better mirror the continuous ovarian hormonal fluctuations of the menstrual cycle than a categorized classification of phase [7,63]. In this context, Freemans *et al.* [64] proposed that the absence of a significant change in RQ between menstrual cycle phases may be partly explained by similar E2/P4 ratios. In the present study, the E2/P4 ratio was significantly different between FP and LP and the observed negative correlations between RQ and E2/P4 suggest an increased lipid utilization with higher E2/P4 ratio at rest, after 30 minutes of low-intensity exercise, and after 120 minutes of resting under postprandial conditions. However, the low Spearman's rho values indicate that the results need careful interpretation. Finally, a recent systematic review and meta-analysis published by D'Souza *et al.* [16] suggests that there is little evidence on the effect of HC or menstrual cycle phase on substrate metabolism either at rest or during sub-maximal exercise ($< 70\% \text{VO}_{2\text{max}}$), likely due to an insufficient magnitude of hormonal fluctuation to significantly modulate substrate oxidation [7,16]. Our results seem to confirm the majority of these conclusions but it is important, in future research, to consider and interpret data in regards to the nature and context of exercise performed, and the characteristics of the study population. Indeed, it is acknowledged that athletes do not exhibit similar metabolic responses or adaptations to exercise to those of inactive or moderately active females. Importantly, the differences in energy efficiency between HC+ and HC- athletes and between the FP and LP in HC- athletes observed in the present study remain minor, despite being statistically significant, which warrants cautious interpretation and future research to determine any specific physiological implications.

4.3. Strength, limitations and perspectives

While the identification of menstrual cycle phase by counting of days from the first day of each cycle (menses) and determination of menstrual cycle length remain challenging and represent a methodological limitation of many studies conducted in this field, these techniques were complemented here by salivary hormone analyses. The choice to quantify the female sex hormones E2 and P4 through saliva analysis instead of blood sampling was justified by the non-invasive nature and practicality of this method under ecological conditions, especially with national-level athletes [59].

Nonetheless, the E2 and P4 concentrations were within physiological range for HC+ [65–67] and HC- in both menstrual cycle phases [59–61]. It would have been interesting to determine the sub-phases of the athletes' menstrual cycle by scheduling measurements at four different times, identified as "key" by Elliott-Sale [68]. However, while such measurements were not possible in the present study owing to practicality and participant availability during this period of preparation for national championship competition, consideration of E2/P4 ratio appears relevant to investigate the continuous hormonal fluctuations investigated here. Since the sports included here are team sports, the athletes followed similar programs and therefore comparable intensities, types, and frequencies of training leading up to championships, ensuring uniformity in training load between athletes [69]. Moving forward, comparing high-load training phases with low-load, to understand the interaction between training load and ovarian hormonal status, would be beneficial as resulting responses may be different [70].

Additionally, as in many studies, the calculation of means and standard deviations may hide inter and intra individual differences among females and their hormonal statuses. Indeed, it is often emphasized that each woman and each menstrual cycle is unique. For this reason, individual results were considered through the graphical representation (**Figure 2, Supplementary file 1**). This highlights different metabolic adaptations specific to each athlete in response to their own hormonal status, even with menstrual cycle disorders, such as within the participants amenorrhea presented here (**Supplementary file 2**). Thus, further studies should also consider the results on an individual basis to offer individualized monitoring for athletes' health and performance.

5. CONCLUSION

Finally, this study appears to be the first to have investigated energy metabolism at rest, under fasting and postprandial conditions, and during low-intensity exercise in female athletes during a period of intense training load. The results suggest that ovarian hormonal status does not impact energy expenditure or substrate utilization at rest in the fasted state, nor up to 2 hours post-ingestion of a calibrated mixed breakfast meal. However, a significantly higher net energy cost of low intensity exercise in HC+ compared with HC- athletes, and increased CHO oxidation in the LP compared to the FP during low intensity exercise in HC- athletes were observed and may suggest consideration be given to tailored training loads and/or recovery strategies. In addition, a higher E2/P4 ratio was mildly associated with increased lipid oxidation during the rest, exercise and postprandial periods, calling for future research into this area, in order to optimize the female athlete health and performance.

Acknowledgment: The authors would like to thank the athletes who took part to this study.

Author contribution: Conceptualisation: DT, LI, MD; Fundings: CG, ECB, DT, MD, LI; Data collection: SB; Data analyses: SB, EF; Biological analyses: FD, Statistical analyses: BP; First draft: SB; Reviewing: BP, CG, ECB, JLMC, DT, MD, LI.

Sources of Support: This work was realized as a part of the French “Plan de Relance” fund from the National Research Agency (ANR) and the International Research Chair Health in Motion.

Author Declarations: The authors have no conflicts of interest to declare.

Data availability: Data will be made available upon reasonable request to the corresponding author.

REFERENCES

- [1] Costello JT, Bieuzen F, Bleakley CM. Where are all the female participants in Sports and Exercise Medicine research? *Eur J Sport Sci* 2014;14:847–51. <https://doi.org/10.1080/17461391.2014.911354>.
- [2] Nolan D, McNulty KL, Manninen M, Egan B. The Effect of Hormonal Contraceptive Use on Skeletal Muscle Hypertrophy, Power and Strength Adaptations to Resistance Exercise Training: A Systematic Review and Multilevel Meta-analysis. *Sports Med* 2023. <https://doi.org/10.1007/s40279-023-01911-3>.
- [3] Taim BC, Ó Catháin C, Renard M, Elliott-Sale KJ, Madigan S, Ní Chéilleachair N. The Prevalence of Menstrual Cycle Disorders and Menstrual Cycle-Related Symptoms in Female Athletes: A Systematic Literature Review. *Sports Med* 2023;53:1963–84. <https://doi.org/10.1007/s40279-023-01871-8>.
- [4] Brown N, Knight CJ, Forrest Née Whyte LJ. Elite female athletes' experiences and perceptions of the menstrual cycle on training and sport performance. *Scand J Med Sci Sports* 2021;31:52–69. <https://doi.org/10.1111/sms.13818>.
- [5] Ekenros L, von Rosen P, Solli GS, Sandbakk Ø, Holmberg H-C, Hirschberg AL, et al. Perceived impact of the menstrual cycle and hormonal contraceptives on physical exercise and performance in 1,086 athletes from 57 sports. *Frontiers in Physiology* 2022;13.
- [6] Hackney AC. Menstrual Cycle Hormonal Changes and Energy Substrate Metabolism in Exercising Women: A Perspective. *Int J Environ Res Public Health* 2021;18:10024. <https://doi.org/10.3390/ijerph181910024>.
- [7] Oosthuysen T, Strauss JA, Hackney AC. Understanding the female athlete: molecular mechanisms underpinning menstrual phase differences in exercise metabolism. *Eur J Appl Physiol* 2022. <https://doi.org/10.1007/s00421-022-05090-3>.
- [8] Zderic TW, Coggan AR, Ruby BC. Glucose kinetics and substrate oxidation during exercise in the follicular and luteal phases. *J Appl Physiol* (1985) 2001;90:447–53. <https://doi.org/10.1152/jappl.2001.90.2.447>.
- [9] Hackney AC. Influence of oestrogen on muscle glycogen utilization during exercise. *Acta Physiol Scand* 1999;167:273–4. <https://doi.org/10.1046/j.1365-201x.1999.00605.x>.
- [10] Beidleman BA, Rock PB, Muza SR, Fulco CS, Gibson LL, Kamimori GH, et al. Substrate oxidation is altered in women during exercise upon acute altitude exposure. *Med Sci Sports Exerc* 2002;34:430–7. <https://doi.org/10.1097/00005768-200203000-00008>.
- [11] Constantini NW, Dubnov G, Lebrun CM. The menstrual cycle and sport performance. *Clin Sports Med* 2005;24:e51-82, xiii–xiv. <https://doi.org/10.1016/j.csm.2005.01.003>.
- [12] Lebrun CM, Petit MA, McKenzie DC, Taunton JE, Prior JC. Decreased maximal aerobic capacity with use of a triphasic oral contraceptive in highly active women: a randomised controlled trial. *British Journal of Sports Medicine* 2003;37:315–20. <https://doi.org/10.1136/bjism.37.4.315>.
- [13] Willett HN, Koltun KJ, Hackney AC. Influence of Menstrual Cycle Estradiol- β -17 Fluctuations on Energy Substrate Utilization-Oxidation during Aerobic, Endurance Exercise. *Int J Environ Res Public Health* 2021;18:7209. <https://doi.org/10.3390/ijerph18137209>.
- [14] Hackney AC, McCracken-Compton MA, Ainsworth B. Substrate responses to submaximal exercise in the midfollicular and midluteal phases of the menstrual cycle. *Int J Sport Nutr* 1994;4:299–308. <https://doi.org/10.1123/ijns.4.3.299>.
- [15] D'Souza AC, Wageh M, Williams JS, Colenso-Semple LM, McCarthy DG, McKay AKA, et al. Menstrual cycle hormones and oral contraceptives: a multimethod systems physiology-based review of their impact on key aspects of female physiology. *J Appl Physiol* (1985) 2023;135:1284–99. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00346.2023>.
- [16] Williams JS, Stone JC, Masood Z, Bostad W, Gibala MJ, MacDonald MJ. The impact of natural menstrual cycle and oral contraceptive pill phase on substrate oxidation during rest and acute submaximal aerobic exercise. *J Appl Physiol* (1985) 2023;135:642–54. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00111.2023>.

- [17] Sung E, Han A, Hinrichs T, Vorgerd M, Machado C, Platen P. Effects of follicular versus luteal phase-based strength training in young women. *Springerplus* 2014;3:668. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-668>.
- [18] Sims ST, Kerksick CM, Smith-Ryan AE, Janse de Jonge XAK, Hirsch KR, Arent SM, et al. International society of sports nutrition position stand: nutritional concerns of the female athlete. *J Int Soc Sports Nutr* 2023;20:2204066. <https://doi.org/10.1080/15502783.2023.2204066>.
- [19] Isacco L, Thivel D, Pelle AM, Zouhal H, Duclos M, Duche P, et al. Oral contraception and energy intake in women: impact on substrate oxidation during exercise. *Appl Physiol Nutr Metab* 2012;37:646–56. <https://doi.org/10.1139/h2012-031>.
- [20] Rael B, Alfaro-Magallanes VM, Romero-Parra N, Castro EA, Cupeiro R, Janse de Jonge XAK, et al. Menstrual Cycle Phases Influence on Cardiorespiratory Response to Exercise in Endurance-Trained Females. *Int J Environ Res Public Health* 2021;18:860. <https://doi.org/10.3390/ijerph18030860>.
- [21] Bagot S, Pereira B, Lambert C, Pelissier L, Chanseaux E, Duclos M, et al. A reproducible, self-reported, field-based tool for monitoring ovarian hormone status and body weight variations in female athletes: the Answ'Her questionnaire. *J Sports Med Phys Fitness* 2024. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.24.15879-3>.
- [22] Gibney, M.J., Barr, S.I., Bellisle, F., Drewnowski, A., Fagt, S., Hopkins, S., Livingstone, B., Varela-Moreiras, G., Moreno, L., Smith, J., Vieux, F., Thielecke, F., and Masset, G. Towards an Evidence-Based Recommendation for a Balanced Breakfast—A Proposal from the International Breakfast Research Initiative. *Nutrients* 2018;10(10): 1540. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi/10.3390/nu10101540>.
- [23] Black AE, Coward WA, Cole TJ, Prentice AM. Human energy expenditure in affluent societies: an analysis of 574 doubly-labelled water measurements. *Eur J Clin Nutr* 1996;50:72–92.
- [24] Green SM, Delargy HJ, Joanes D, Blundell JE. A satiety quotient: a formulation to assess the satiating effect of food. *Appetite* 1997;29:291–304. <https://doi.org/10.1006/appe.1997.0096>.
- [25] Péneau S, Bénard M, Robert M, Allès B, Andreeva VA, Courtois F, et al. Validation of the Flexible and Rigid Cognitive Restraint Scales in a General French Population. *Int J Environ Res Public Health* 2022;19:12519. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912519>.
- [26] Julia C, Méjean C, Touvier M, Péneau S, Lassale C, Ducrot P, et al. Validation of the FSA nutrient profiling system dietary index in French adults-findings from SUVIMAX study. *Eur J Nutr* 2016;55:1901–10. <https://doi.org/10.1007/s00394-015-1006-y>.
- [27] Zuntz N. Ueber die Bedeutung der verschiedenen Nährstoffe als Erzeuger der Muskelkraft. *Pflüger, Arch* 1901;83:557–71. <https://doi.org/10.1007/BF01746509>.
- [28] Péronnet F, Massicotte D. Péronnet F, Massicotte D Table of nonprotein respiratory quotient: an update. *Can J Sport Sci* 16:23-29. *Canadian Journal of Sport Sciences = Journal Canadien Des Sciences Du Sport* 1991;16:23–9.
- [29] Rael B, Romero-Parra N, Alfaro-Magallanes VM, Barba-Moreno L, Cupeiro R, Janse de Jonge X, et al. Body Composition Over the Menstrual and Oral Contraceptive Cycle in Trained Females. *Int J Sports Physiol Perform* 2021;16:375–81. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2020-0038>.
- [30] Cumberledge EA, Myers C, Venditti JJ, Dixon CB, Andreacci JL. The Effect of the Menstrual Cycle on Body Composition Determined by Contact-Electrode Bioelectrical Impedance Analyzers. *Int J Exerc Sci* 2018;11:625–32.
- [31] Gould LM, Cabre HE, Brewer GJ, Hirsch KR, Blue MNM, Smith-Ryan AE. Impact of Follicular Menstrual Phase on Body Composition Measures and Resting Metabolism. *Med Sci Sports Exerc* 2021;53:2396–404. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002702>.

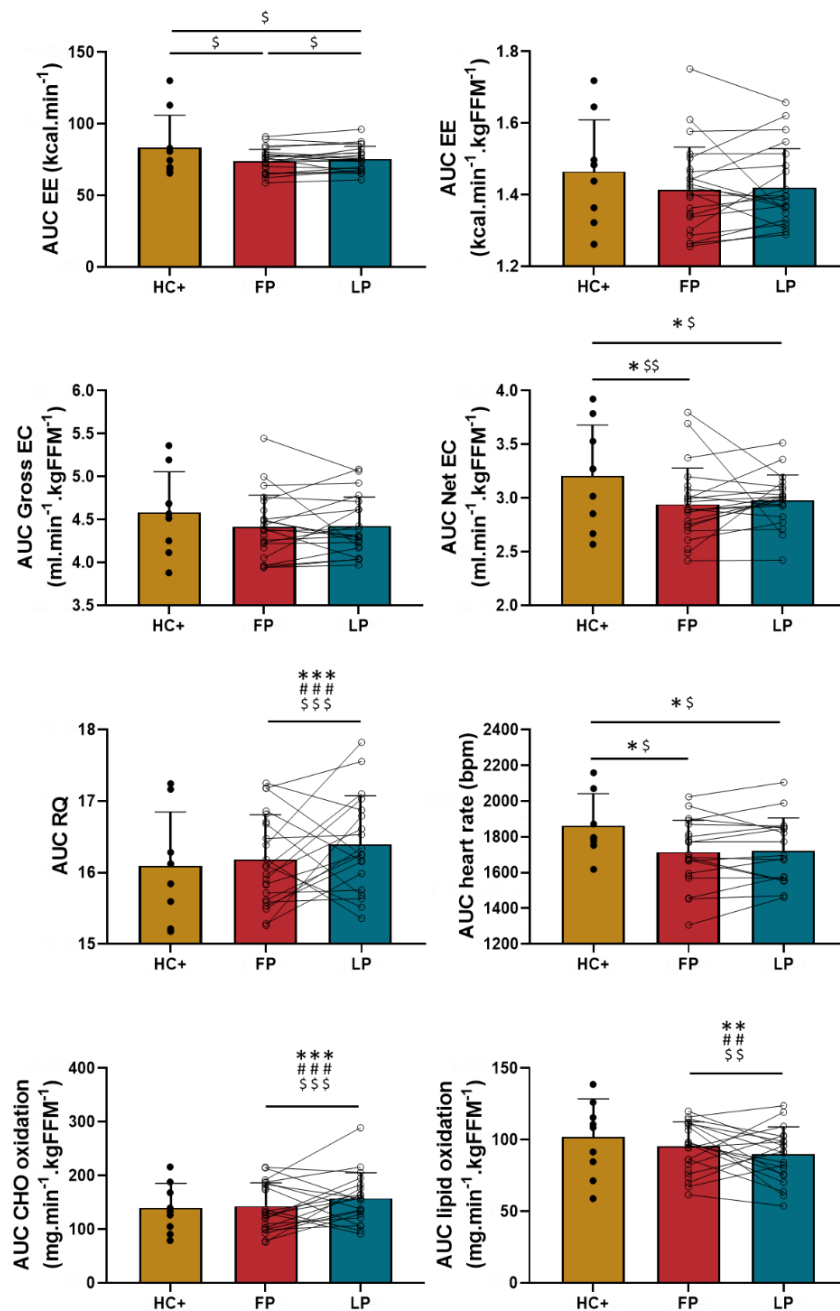
- [32] Eck LH, Bennett AG, Egan BM, Ray JW, Mitchell CO, Smith MA, et al. Differences in macronutrient selections in users and nonusers of an oral contraceptive. *Am J Clin Nutr* 1997;65:419–24. <https://doi.org/10.1093/ajcn/65.2.419>.
- [33] Jensen MD, Levine J. Effects of oral contraceptives on free fatty acid metabolism in women. *Metabolism* 1998;47:280–4. [https://doi.org/10.1016/s0026-0495\(98\)90257-8](https://doi.org/10.1016/s0026-0495(98)90257-8).
- [34] Devries MC, Hamadeh MJ, Phillips SM, Tarnopolsky MA. Menstrual cycle phase and sex influence muscle glycogen utilization and glucose turnover during moderate-intensity endurance exercise. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 2006;291:R1120–1128. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00700.2005>.
- [35] Ortega-Santos CP, Barba-Moreno L, Cupeiro R, Peinado AB. Substrate oxidation in female adults during endurance exercise throughout menstrual cycle phases: IronFEMME pilot study. *Journal of Human Sport and Exercise* 2018;13:553–65. <https://doi.org/10.14198/jhse.2018.133.07>.
- [36] Bembien DA, Boileau RA, Bahr JM, Nelson RA, Misner JE. Effects of oral contraceptives on hormonal and metabolic responses during exercise. *Med Sci Sports Exerc* 1992;24:434–41.
- [37] Bonen A, Haynes FW, Graham TE. Substrate and hormonal responses to exercise in women using oral contraceptives. *J Appl Physiol* (1985) 1991;70:1917–27. <https://doi.org/10.1152/jappl.1991.70.5.1917>.
- [38] Casazza GA, Jacobs KA, Suh S-H, Miller BF, Horning MA, Brooks GA. Menstrual cycle phase and oral contraceptive effects on triglyceride mobilization during exercise. *J Appl Physiol* (1985) 2004;97:302–9. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00050.2004>.
- [39] Isacco L, Thivel D, Meddahi-Pelle A, Lemoine-Morel S, Duclos M, Boisseau N. Exercise per se masks oral contraceptive-induced postprandial lipid mobilization. *Appl Physiol Nutr Metab* 2014;39:1222–9. <https://doi.org/10.1139/apnm-2014-0053>.
- [40] Jacobs KA, Casazza GA, Suh S-H, Horning MA, Brooks GA. Fatty acid reesterification but not oxidation is increased by oral contraceptive use in women. *J Appl Physiol* (1985) 2005;98:1720–31. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00685.2004>.
- [41] Isacco L, Thivel D, Pereira B, Duclos M, Boisseau N. Maximal fat oxidation, but not aerobic capacity, is affected by oral contraceptive use in young healthy women. *Eur J Appl Physiol* 2015;115:937–45. <https://doi.org/10.1007/s00421-014-3075-7>.
- [42] Metz L, Isacco L, Redman LM. Effect of oral contraceptives on energy balance in women: A review of current knowledge and potential cellular mechanisms. *Metabolism* 2022;126:154919. <https://doi.org/10.1016/j.metabol.2021.154919>.
- [43] Suh S-H, Casazza GA, Horning MA, Miller BF, Brooks GA. Effects of oral contraceptives on glucose flux and substrate oxidation rates during rest and exercise. *J Appl Physiol* (1985) 2003;94:285–94. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00693.2002>.
- [44] Tremblay J, Peronnet F, Massicotte D, Lavoie C. Carbohydrate supplementation and sex differences in fuel selection during exercise. *Med Sci Sports Exerc* 2010;42:1314–23. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181cbba0b>.
- [45] Matsuda-Nakamura M, Yasuhara S, Nagashima K. Effect of menstrual cycle on thermal perception and autonomic thermoregulatory responses during mild cold exposure. *J Physiol Sci* 2015;65:339–47. <https://doi.org/10.1007/s12576-015-0371-x>.
- [46] Vaiksaar S, Jürimäe J, Mäestu J, Purge P, Kalytko S, Shakhlina L, et al. No effect of menstrual cycle phase and oral contraceptive use on endurance performance in rowers. *J Strength Cond Res* 2011;25:1571–8. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181df7fd2>.
- [47] Bailey SP, Zacher CM, Mittleman KD. Effect of menstrual cycle phase on carbohydrate supplementation during prolonged exercise to fatigue. *J Appl Physiol* (1985) 2000;88:690–7. <https://doi.org/10.1152/jappl.2000.88.2.690>.

- [48] Horton TJ, Miller EK, Glueck D, Tench K. No effect of menstrual cycle phase on glucose kinetics and fuel oxidation during moderate-intensity exercise. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 2002;282:E752-762. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00238.2001>.
- [49] Benton MJ, Hutchins AM, Dawes JJ. Effect of menstrual cycle on resting metabolism: A systematic review and meta-analysis. *PLOS ONE* 2020;15:e0236025. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236025>.
- [50] Melanson KJ, Saltzman Edward, Russell Robert, Roberts SB. Postabsorptive and Postprandial Energy Expenditure and Substrate Oxidation Do Not Change during the Menstrual Cycle in Young Women. *The Journal of Nutrition* 1996;126:2531-8. <https://doi.org/10.1093/jn/126.10.2531>.
- [51] Suh S-H, Casazza GA, Horning MA, Miller BF, Brooks GA. Luteal and follicular glucose fluxes during rest and exercise in 3-h postabsorptive women. *Journal of Applied Physiology* 2002;93:42-50. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01080.2001>.
- [52] De Souza MJ, Maguire MS, Rubin KR, Maresh CM. Effects of menstrual phase and amenorrhea on exercise performance in runners. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 1990;22:575.
- [53] Frandsen J, Pistoljevic N, Quesada JP, Amaro-Gahete FJ, Ritz C, Larsen S, et al. Menstrual cycle phase does not affect whole body peak fat oxidation rate during a graded exercise test. *J Appl Physiol (1985)* 2020;128:681-7. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00774.2019>.
- [54] Campbell SE, Angus DJ, Febbraio MA. Glucose kinetics and exercise performance during phases of the menstrual cycle: effect of glucose ingestion. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 2001;281:E817-25. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.2001.281.4.e817>.
- [55] Hackney AC, Curley CS, Nicklas BJ. Physiological responses to submaximal exercise at the mid-follicular, ovulatory and mid-luteal phases of the menstrual cycle. *Scand J Med Sci Sports* 1991;1:94-8. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.1991.tb00277.x>.
- [56] Boisseau N, Isacco L. Substrate metabolism during exercise: sexual dimorphism and women's specificities. *Eur J Sport Sci* 2021;1-21. <https://doi.org/10.1080/17461391.2021.1943713>.
- [57] de Glisezinski I. Mobilisation des lipides du tissu adipeux au cours de l'exercice physique. *Science & Sports* 2007;22:280-5. <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2007.09.013>.
- [58] Achten J, Jeukendrup AE. Optimizing fat oxidation through exercise and diet. *Nutrition* 2004;20:716-27. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2004.04.005>.
- [59] Allen AM, McRae-Clark AL, Carlson S, Saladin ME, Gray KM, Wetherington CL, et al. Determining Menstrual Phase in Human Biobehavioral Research: A Review with Recommendations. *Exp Clin Psychopharmacol* 2016;24:1-11. <https://doi.org/10.1037/pha0000057>.
- [60] Gandara BK, Leresche L, Mancl L. Patterns of salivary estradiol and progesterone across the menstrual cycle. *Ann N Y Acad Sci* 2007;1098:446-50. <https://doi.org/10.1196/annals.1384.022>.
- [61] Celec P, Ostaniková D, Skoknová M, Hodosy J, Putz Z, Kúdela M. Salivary sex hormones during the menstrual cycle. *Endocr J* 2009;56:521-3. <https://doi.org/10.1507/endocrj.k09e-020>.
- [62] D'Eon TM, Sharoff C, Chipkin SR, Grow D, Ruby BC, Braun B. Regulation of exercise carbohydrate metabolism by estrogen and progesterone in women. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 2002;283:E1046-1055. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00271.2002>.
- [63] Hackney AC, Koltun KJ, Williett HN. Menstrual cycle hormonal changes: estradiol- β -17 and progesterone interactions on exercise fat oxidation. *Endocrine* 2022;76:240-2. <https://doi.org/10.1007/s12020-022-02998-w>.
- [64] Freemans JA, Baranauskas MN, Constantini K, Constantini N, Greenshields JT, Mickleborough TD, et al. Exercise Performance Is Impaired during the Midluteal Phase of the Menstrual Cycle. *Med Sci Sports Exerc* 2021;53:442-52. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002464>.

- [65] Liening SH, Stanton SJ, Saini EK, Schultheiss OC. Salivary testosterone, cortisol, and progesterone: two-week stability, interhormone correlations, and effects of time of day, menstrual cycle, and oral contraceptive use on steroid hormone levels. *Physiol Behav* 2010;99:8–16. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2009.10.001>.
- [66] Mackay K, González C, Zbinden-Foncea H, Peñailillo L. Effects of oral contraceptive use on female sexual salivary hormones and indirect markers of muscle damage following eccentric cycling in women. *Eur J Appl Physiol* 2019;119:2733–44. <https://doi.org/10.1007/s00421-019-04254-y>.
- [67] Schultheiss OC, Dargel A, Rohde W. Implicit motives and gonadal steroid hormones: effects of menstrual cycle phase, oral contraceptive use, and relationship status. *Horm Behav* 2003;43:293–301. [https://doi.org/10.1016/s0018-506x\(03\)00003-5](https://doi.org/10.1016/s0018-506x(03)00003-5).
- [68] Elliott-Sale K. Ovarian hormones: How to conduct high-quality sport and exercise science research on female athletes 2023;36.
- [69] Vogel K, Larsen B, McLellan C, Bird SP. Female Athletes and the Menstrual Cycle in Team Sports: Current State of Play and Considerations for Future Research. *Sports (Basel)* 2023;12:4. <https://doi.org/10.3390/sports12010004>.
- [70] Carlin H, Dupuit M, Storme F, Chassard T, Meignié A, Sachet I, et al. Impact of menstrual cycle or combined oral contraception on elite female cyclists' training responses through a clustering analysis of training sessions. *Frontiers in Sports and Active Living* 2024;6.

SUPPLEMENTARY FILES

SUPPLEMENTARY FILE 1. Area under the curve of energy metabolism and heart rate during exercise and postprandial conditions.

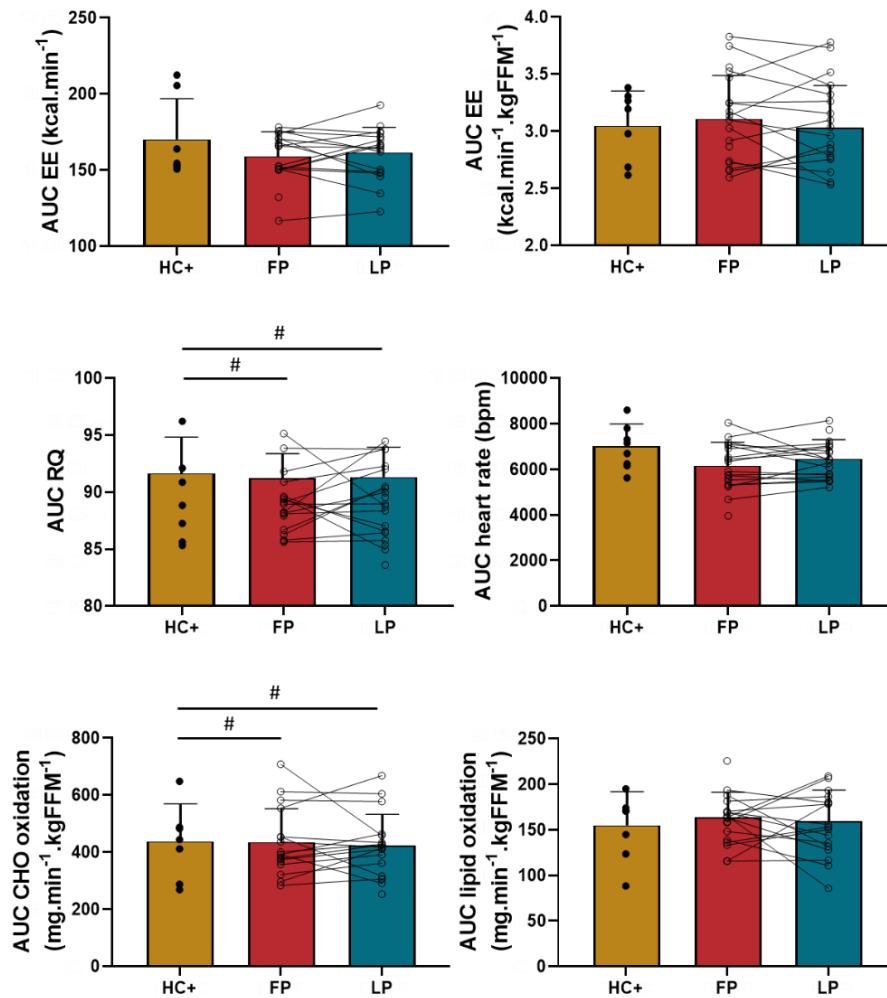


Supplementary file 1.a. Area under the curve of energy metabolism and heart rate during the total exercise period of 30 min.

Missing AUC data in HR for 1 HC+, 1 FP and 2 LP.

Significant differences between groups: without adjustment: * p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001; adjusted to BMI: # p<0.05, ## p<0.01, ### p<0.001; adjusted to %FM: \$ p<0.05, \$\$ p<0.01, \$\$\$ p<0.001.

AUC: area under the curve, CHO: carbohydrates, HC+: athletes using hormonal contraceptives, EC: energetic cost, FP: follicular phase, LP: luteal phase, RQ: respiratory quotient, HR: heart rate, EE: energy expenditure, FFM: fat-free mass.



Supplementary file 1.b. Area under the curve of energy metabolism and heart rate in the total postprandial period of 120 min.

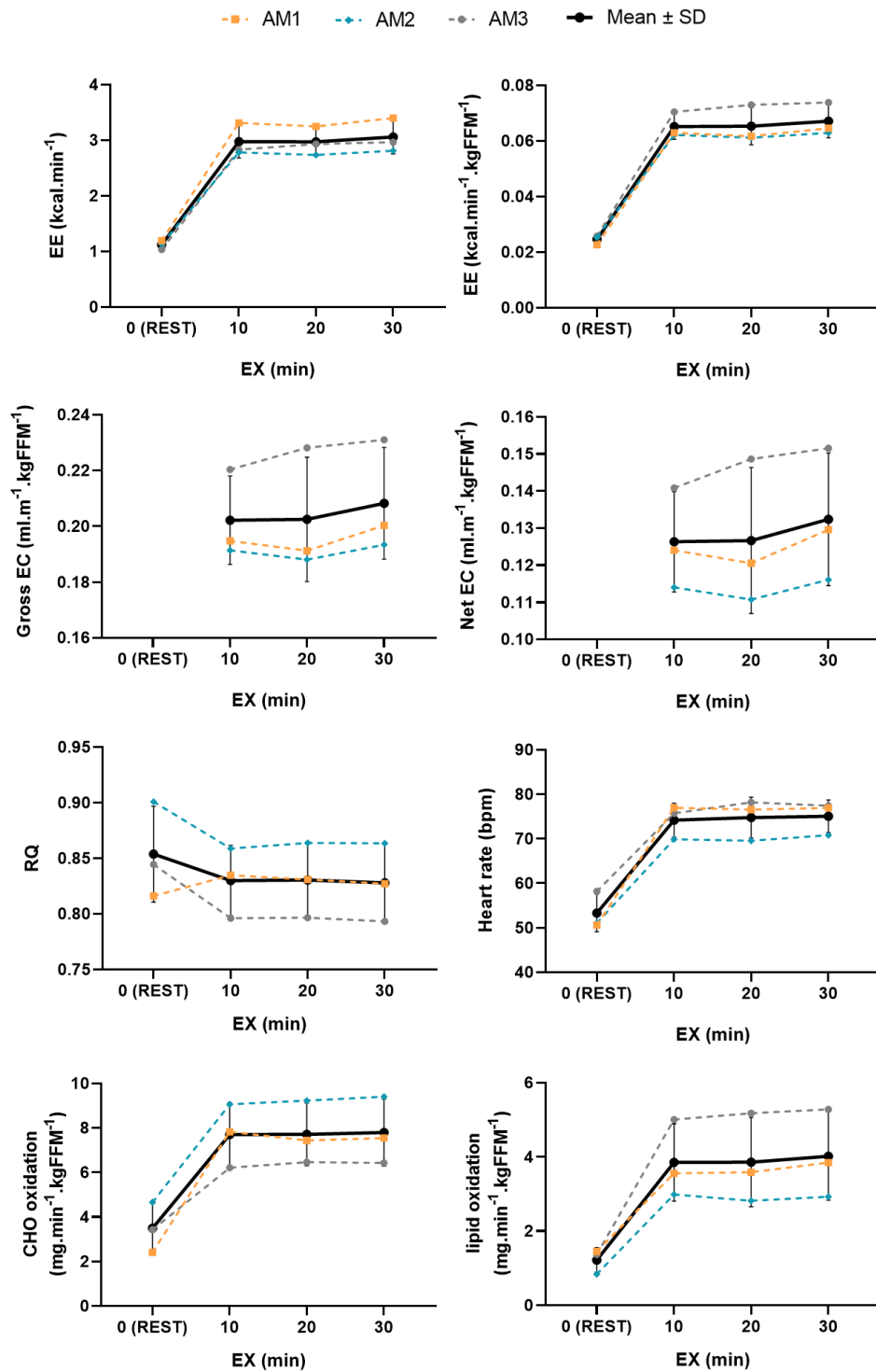
Missing data for AUC in energy metabolism for 2 HC+, 4 FP and 1 LP, and in HR for 1 HC+, 3 FP and 1 LP. Significant differences between groups: without adjustment: * p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001; adjusted to BMI: # p<0.05, ## p<0.01, ### p<0.001; adjusted to %FM: \$ p<0.05, \$\$ p<0.01, \$\$\$ p<0.001. AUC: area under the curve, CHO: carbohydrates, HC+: athletes using hormonal contraceptives, FP: follicular phase, LP: luteal phase, RQ: respiratory quotient, HR: heart rate, EE: energy expenditure, FFM: fat-free mass.

SUPPLEMENTARY FILE 2. Profile, energy metabolism and heart rate results of athletes with amenorrhea.

Supplementary file 2.a. Profile of athletes with amenorrhea.

	AM1	AM2	AM3	TOTAL (N = 3)
Age (years)	18	21	18	19.0 ± 1.7
Ovarian hormonal status				
AM type	Primary AM	Secondary AM	Secondary AM	
17β-estradiol (pmol.l ⁻¹)	1.66	3.30	3.38	2.78 ± 0.97
Progesterone (nmol.l ⁻¹)	0.02	0.28	0.20	0.17 ± 0.13
Anthropometry and body composition				
BMI (kg.m ⁻²)	25.5	20.0	19.7	21.7 ± 3.2
Height (cm)	164	162	158	161.3 ± 3.1
Weight (kg)	68.5	52.5	49.3	56.8 ± 10.3
FM (%)	19.6	11	14.1	14.9 ± 4.4
Android FM (%)	20.2	10.5	12	14.2 ± 5.2
Gynoid FM (%)	25.3	15.1	19.7	20.0 ± 5.1
FFM (kg)	52.6	44.7	40.2	45.9 ± 6.3
BMC (kg)	2.38	2.04	2.16	2.19 ± 0.17
BMD (g.cm ⁻²)	1.16	1.18	1.24	1.19 ± 0.05
TBW (%)	56.9	68.1	65.1	63.4 ± 5.8
Nutritional profile				
TFEQ				
Uncontrolled Eating	2.7	3.0	2.0	2.6 ± 0.5
Cognitive Restraint	3.2	3.8	2.3	3.1 ± 0.8
External Eating	2.0	2.7	1.7	2.1 ± 0.5
Food intake				
EI (kcal/d)	2570	2524	2114	2402 ± 251
CHO (g, %EI)	287.8 (44.8%)	351.4 (55.7%)	293.2 (55.5%)	310.8 ± 35.3 (52.0 ± 6.2%)
Lipid (g, %EI)	60.2 (21.1%)	57.3 (20.4%)	56.9 (24.2%)	58.1 ± 1.8 (21.9 ± 2.0%)
Protein (g, %EI)	180.5 (27.1%)	132.2 (21.0%)	80.5 (15.2%)	131.1 ± 50.0 (21.1 ± 6.0%)

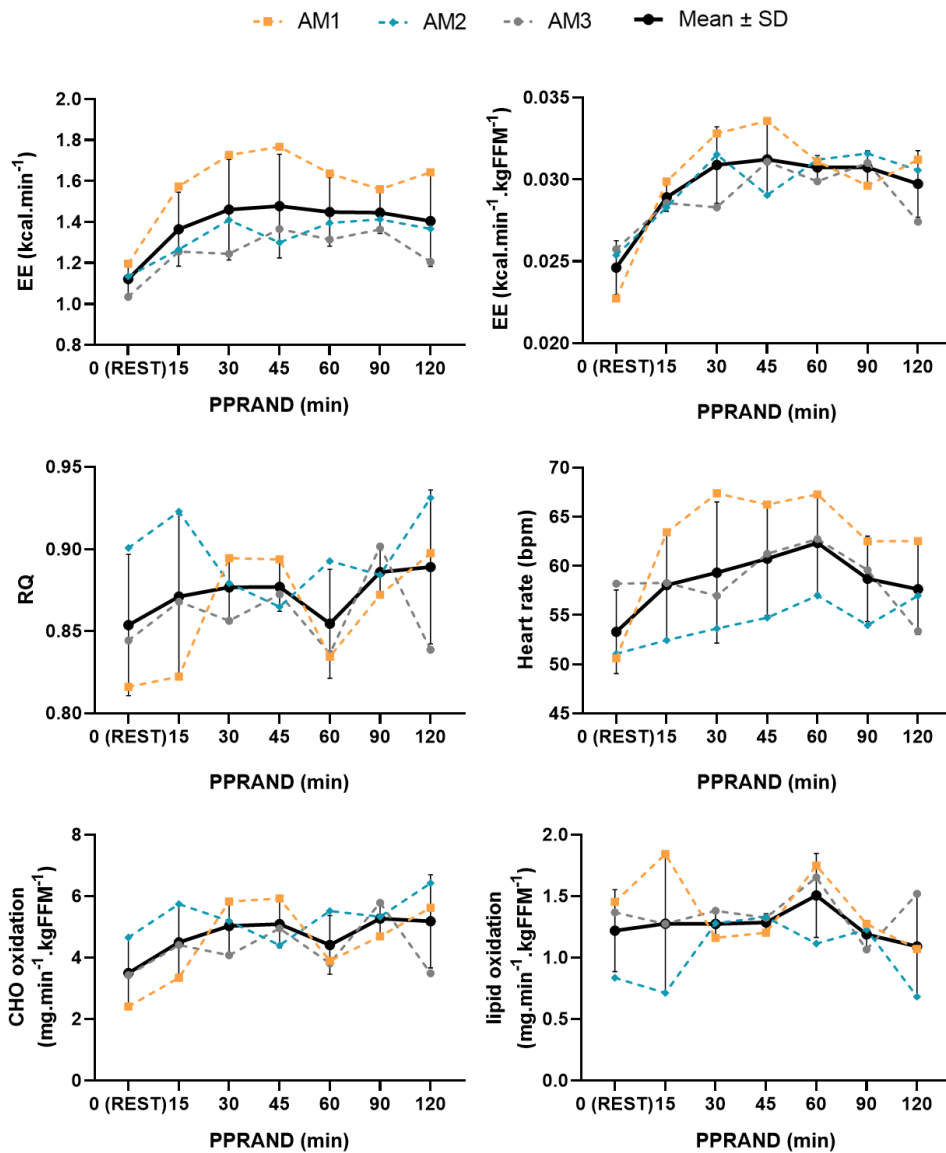
AM: amenorrhea, BMI: body mass index, CHO: carbohydrates, BMC: bone mineral content, BMD: bone mineral density, EI: energy intake, FFM: fat-free mass, FM: fat mass, TBW: total body water, TFEQ: three-factor eating questionnaire.



Supplementary file 2.b. Individual energy metabolism and HR results of individuals with AM in fasting rest and during exercise.

T = 0 min corresponds to the data collected at rest in fasting conditions.

AM: amenorrhea, bpm: beat per minute, CHO: carbohydrates, EC: energetic cost, EE: energy expenditure, EX: exercise, HR: heart rate, FFM: fat-free mass, RQ: respiratory quotient.



Supplementary file 2.c. Individual energy metabolism and HR results of individuals with AM in fasting rest and postprandial.

T = 0 min corresponds to the data collected at rest in fasting conditions.

AM: amenorrhea, bpm: beat per minute, CHO: carbohydrates, EC: energetic cost, EE: energy expenditure, EX: exercise, HR: heart rate, FFM: fat-free mass, RQ: respiratory quotient.

DISCUSSION ET PERSPECTIVES GÉNÉRALES DU PROJET DE THÈSE

Les athlètes présentent des adaptations physiologiques en réponse à leur haut niveau d'activité physique et à leur volume d'entraînements (Burton et al. 2004), mais ces adaptations peuvent être influencées par divers facteurs. La pratique du « *weight cycling* » et le statut hormonal ovarien sont deux facteurs susceptibles d'interférer dans les adaptations énergétiques des athlètes à court, moyen et long terme, mais ils sont encore peu pris en compte dans ces populations. Ainsi, l'objectif général de ce travail de thèse était d'étudier les adaptations énergétiques en réponse aux variations de poids et au statut hormonal ovarien chez les athlètes.

I. Adaptations métaboliques et nutritionnelles à un épisode de perte et reprise de poids chez les athlètes habitués au « *weight cycling* »

Dans de nombreuses pratiques sportives, les athlètes peuvent être amenés à pratiquer le « *weight cycling* » pour des questions de performance (optimisation du rapport poids-puissance, respect d'une catégorie de poids, etc.). Des adaptations métaboliques et nutritionnelles en réponse à la perte de poids ont été précédemment mises en évidence chez les individus normo-pondérés, en situation de surpoids et d'obésité, les exposant à un risque accru de reprise de poids et/ou de MG excessive et de comorbidités métaboliques (Dulloo 2021; Nunes et al. 2022b). Cependant, le niveau d'activité physique élevé des athlètes et leurs stratégies spécifiques de gestion du poids pourraient influencer ces adaptations différemment (Miles-Chan and Isacco 2021; Bagot et al. 2024). De ce fait, notre objectif principal était d'étudier les adaptations métaboliques et nutritionnelles en réponse à un épisode de variations de poids chez des athlètes habitués au « *weight cycling* » et, dans un second temps, de considérer l'influence du type de sport pratiqué (sport de combat, de force et d'endurance) et du sexe des athlètes sur ces adaptations (**Axe I**).

Nos résultats ont mis en évidence (à l'échelle du groupe total) qu'une perte de poids modérée ($-4,4 \pm 2,3\%$), due à une perte significative de MG ($-12,2 \pm 10,6\%$) et de MNG ($-2,6 \pm 2,3\%$), n'entraîne pas de reprise excessive de MG ou MNG à l'issue de la reprise de poids, suggérant l'absence de « *fat overshoot* ». Les 48 participants ont utilisé leurs stratégies habituelles au cours de cet épisode de « *weight cycling* », en termes de durée, de degrés de perte de poids et de méthodes employées (restriction calorique, exercice, déshydratation, etc.). Le niveau d'activité physique important tout au long du cycle de perte et de reprise de poids pourrait expliquer cette absence de « *fat overshoot* », en accord avec de récentes revues narratives (Miles-Chan and Isacco 2021) ainsi que systématiques et méta-analytiques (Bagot et al. 2024).

Il est important de noter que ces résultats, obtenus sur l'ensemble du groupe, doivent également être interprétés en tenant compte des spécialités sportives des participants et de leurs caractéristiques individuelles. En effet, à l'issue de la reprise de poids, les athlètes d'endurance ont récupéré significativement plus de MG que les athlètes de combat, tandis que ces derniers n'ont pas repris toute leur MG malgré une restauration de leur MNG initiale. Selon la courbe de Forbes, les individus ayant une faible adiposité initiale tendent à perdre une proportion de MNG plus importante que ceux ayant une adiposité initiale plus élevée (Forbes 1987). Ce phénomène, qui pourrait favoriser un « *fat overshoot* » lors de la reprise de poids, souligne l'importance du « *lean-fat energy partitioning* » avant et pendant la perte de poids (Forbes 1987; Dulloo et al. 2015, 2018). Ainsi, le pourcentage initialement plus faible de MG chez les athlètes d'endurance, bien que non significatif, pourrait expliquer la perte de MNG et la conservation de la MG observées pendant la perte de poids, ce qui favoriserait un « *catch-up fat* » lors de la reprise de poids par rapport aux autres athlètes pratiquant des sports de force ou de combat.

Au regard des adaptations métaboliques analysées dans l'**Étude 2**, aucune modification significative de la DER et de la DEE, ajustées ou non à la MNG, n'a été observée en réponse à la variation de poids, sans influence apparente du type de sport ou du sexe. D'après la littérature existante (Sagayama et al. 2014; Müller et al. 2015; Isola et al. 2023), ces résultats suggèrent que la perte de poids et de MG observée dans notre étude n'était probablement pas suffisante pour activer le contrôle adipo-spécifique de la thermogénèse adaptative (Dulloo and Jacquet 1998).

Toutefois, une augmentation de l'oxydation des lipides et une diminution de celle des glucides ont été observées au repos et à l'exercice modéré en réponse à la perte de poids, ce qui est en accord avec des études antérieures (Brewer 1992; McCargar and Crawford 1992; Sagayama et al. 2014). L'augmentation du volume d'entraînement et la réduction de l'apport énergétique, notamment en glucides, pourraient expliquer ces résultats. Sagayama et al., ayant fait des observations similaires, ont suggéré que les conditions de restriction énergétique auraient engendré une déplétion des réserves de glycogène hépatique et musculaire, associée à une diminution des concentrations d'insuline, une hormone anti-lipolytique (Sagayama et al. 2019). Dans notre étude, la reprise de poids était accompagnée d'une augmentation du QR au repos et à l'exercice, dépassant les valeurs de la condition contrôle, reflétant une augmentation de l'oxydation des glucides et une réduction de celle des lipides. De précédentes études ayant observé des phénomènes similaires chez des individus en situation de surpoids ou d'obésité ont suggéré que cela pourrait être un facteur prédictif de reprise de poids et de MG (Schutz et al. 1992; Christoffersen et al. 2022). En effet, l'augmentation de l'utilisation des glucides est un signal de régulation orexigène pouvant expliquer la reprise de poids (Zurlo et al. 1990), et la

diminution de l'oxydation des lipides pourrait indiquer une altération métabolique susceptible de favoriser la reprise de poids et de MG à plus long terme.

La perte de poids a été identifiée comme facteur de risque de surconsommation alimentaire ou d'hyperphagie, pouvant contribuer à une reprise de poids excessive (Dulloo et al. 1997). L'analyse des apports nutritionnels dans l'**Étude 3** a révélé une diminution transitoire significative des apports énergétiques chez les athlètes au cours de la perte de poids, bien que des spécificités aient été observées en fonction du type de sport. En particulier, les athlètes pratiquant des sports de combat semblent être davantage concernés par cette diminution, tandis que les athlètes d'endurance ont maintenu des apports énergétiques stables tout au long de la période de perte et de reprise de poids. Ce constat pourrait refléter des stratégies de pertes de poids spécifiques à chaque discipline sportive : une restriction énergétique courte et sévère contribuant à une perte de poids rapide chez les athlètes de combat, et un maintien des apports énergétiques associé à une augmentation du volume d'entraînement chez les athlètes d'endurance (O'Connor and Slater 2011; Bagot et al. 2024). De plus, au cours de l'épisode complet de « *weight cycling* », les athlètes pratiquant des sports de force consommaient plus de protéines et les athlètes d'endurance consommaient plus de lipides par rapport aux autres types de sports. Ces observations sont cohérentes avec les résultats de l'**Étude 1**, qui montraient que les athlètes habitués à des degrés de perte de poids plus importants (correspondant aux athlètes de force dans le cas de l'**Étude 1**) consommaient plus de protéines et moins de lipides en dehors des périodes de variation de poids. Ces athlètes adopteraient donc une stratégie nutritionnelle visant à préserver la MNG. Ainsi, contrairement à la population générale, un contrôle cognitif plus important de l'alimentation quotidienne pourrait réduire la suralimentation compensatoire (généralement observée après une perte de poids jusqu'à la restauration de la MNG initiale dans la population générale) et expliquer en partie l'absence de « *catch-up fat* » chez les athlètes (Dulloo et al. 1997; Miles-Chan and Isacco 2021).

À l'issue de la reprise de poids, les apports énergétiques et les sensations d'appétit étaient similaires à ceux observés en période de poids stable, suggérant une absence de compensation alimentaire hyperphagique après la perte de poids et une prise alimentaire des athlètes correspondant d'avantage à leurs besoins énergétiques (Blundell et al. 2015). Ainsi, le maintien d'une activité physique élevée par les athlètes pendant l'épisode de « *weight cycling* » et la perspective d'une future perte de poids pourraient les maintenir dans une zone de régulation nutritionnelle consciente et maîtrisée (Blundell et al. 2015; Bagot et al. 2024). Cependant, l'augmentation significative de la motivation à consommer des aliments gras en réponse à la perte de poids, qui restait élevée à l'issue de la reprise de poids, suggère une potentielle réponse du système hédonique susceptible de favoriser une augmentation de la prise alimentaire, et donc la reprise de poids à plus long terme. Indépendamment des variations de

poids, les athlètes de combat et les athlètes féminines, tout sport confondu, ont montré un risque accru de troubles hyperphagiques, évalué par le questionnaire « *Binge Eating Scale* » (Brunault et al. 2016), soulignant la nécessité de stratégies préventives pour éviter le développement de ces troubles à long terme.

Finalement, l'étude WAVE a mis en évidence les adaptations métaboliques et nutritionnelles en réponse à une perte de poids modérée chez des athlètes habitués au « *weight cycling* », limitant l'observation d'un « *fat overshoot* » à court terme mais n'excluant pas un risque à long terme (Figure 20).

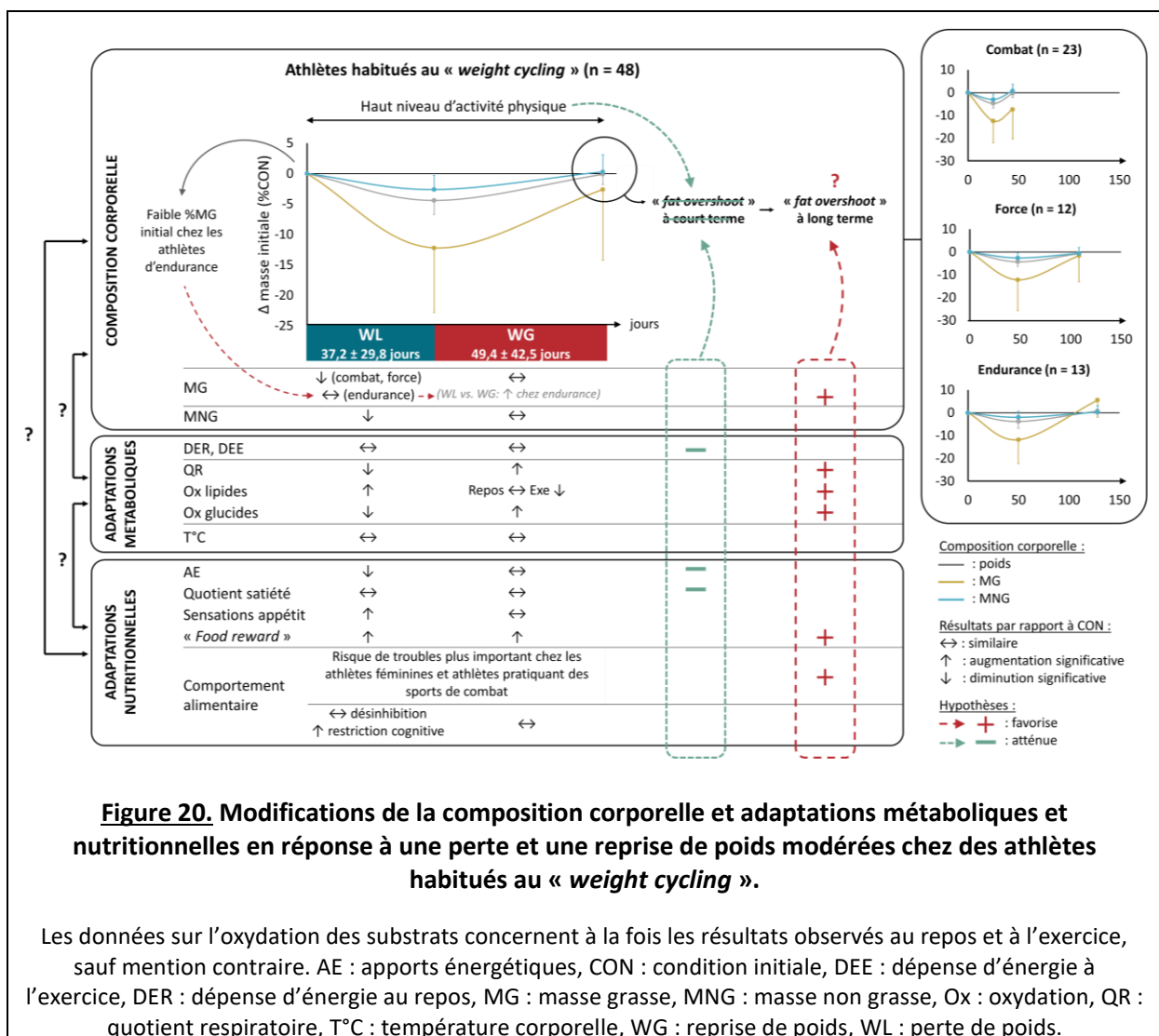


Figure 20. Modifications de la composition corporelle et adaptations métaboliques et nutritionnelles en réponse à une perte et une reprise de poids modérées chez des athlètes habitués au « weight cycling ».

Les données sur l'oxydation des substrats concernent à la fois les résultats observés au repos et à l'exercice, sauf mention contraire. AE : apports énergétiques, CON : condition initiale, DEE : dépense d'énergie à l'exercice, DER : dépense d'énergie au repos, MG : masse grasse, MNG : masse non grasse, Ox : oxydation, QR : quotient respiratoire, T°C : température corporelle, WG : reprise de poids, WL : perte de poids.

Dans l'étude WAVE, les athlètes masculins et féminins semblent présenter des modifications similaires en réponse au « *weight cycling* », tant en termes de composition corporelle, qu'au niveau

des adaptations énergétiques et nutritionnelles. Les effets de l'entraînement pourraient ainsi masquer les différences métaboliques liées au dimorphisme sexuel chez les athlètes (Cano et al. 2022; Isola et al. 2023), généralement observées dans les populations non sportives (Doucet et al. 2000; Drapeau et al. 2003). Cependant, au-delà de la comparaison hommes-femmes, il semble aujourd'hui important d'enrichir le manque de littérature questionnant le potentiel effet du statut hormonal des athlètes féminines sur ces adaptations énergétiques et nutritionnelles.

II. Statut hormonal ovarien et adaptations énergétiques chez les athlètes féminines

Malgré un intérêt croissant pour les spécificités physiologiques féminines dans le domaine des sciences du sport et de l'exercice, l'influence des hormones ovariennes sur le métabolisme énergétique des athlètes féminines reste encore peu explorée. De plus, notre analyse de la littérature actuelle souligne que la majorité des travaux disponibles présentent une relativement faible qualité méthodologique, en raison de la difficulté à évaluer le statut hormonal ovarien (**Axe II : Étude 2**). Ce constat nous a conduit à développer un questionnaire auto-rapporté permettant une meilleure vision et compréhension du statut hormonal des athlètes (et de leur variation de poids) (**Axe II : Étude 1, Questionnaire Answ'Her**) et à adopter une approche scientifique adaptée (**Axe III : Étude CAT Women**). Au-delà de ces aspects méthodologiques, les résultats actuellement disponibles dans des populations non sportives sont divergents et mettent en lumière la complexité de l'étude des effets du statut hormonal ovarien, en raison des interactions possibles avec des paramètres environnementaux ou individuels comme l'état nutritionnel ou la charge d'entraînement. C'est pourquoi, dans ce travail de thèse, un suivi de cohorte a été mis en place pour examiner l'influence du statut hormonal ovarien sur le métabolisme énergétique en période de haute charge d'entraînement, en considérant les trois composantes de la dépense énergétique (repos, exercice et post-prandial) chez des athlètes féminines de niveau national (joueuses de rugby et de football). Les athlètes HC+ ont été testées lors de la phase active de leur contraception orale et les athlètes HC- (cycle moyen de $30,5 \pm 4,8$ jours) au cours de la phase folliculaire (jour $10,2 \pm 3,1$ du cycle) et lutéale (jour $24,9 \pm 3,9$ du cycle).

Les résultats n'ont montré aucune différence de composition corporelle entre les phases du cycle menstruel chez les athlètes HC-. Pour s'affranchir des différences de poids et de MG observées entre les athlètes HC+ et HC-, qui seraient davantage liées à la nature du poste occupé par les rugbywomen

HC+ plutôt qu'à la prise de la contraception orale *per se*, les résultats obtenus ont été ajustés en fonction de l'IMC et du pourcentage de MG. Les analyses n'ont révélé aucun effet significatif de l'utilisation d'une contraception hormonale ni de la phase du cycle menstruel sur le métabolisme énergétique au repos, que ce soit à jeun ou en condition post-prandiale à la suite d'un petit déjeuner calibré et équilibré. Tout en tenant compte des limitations méthodologiques de notre étude, qui seront détaillées par la suite, il peut ainsi être supposé que : i) la haute charge d'entraînement pourrait masquer les potentiels effets induits par le statut hormonal ovarien chez les athlètes, ii) les fluctuations en E2 et P4 entre les phases du cycle menstruel pourraient être insuffisantes en termes de magnitude et de durée pour entraîner des changements métaboliques significatifs au repos (Rael et al. 2021; D'Souza et al. 2023; Kuikman et al. 2024), et/ou iii) la variation intra-individuelle de la DER (dont la variabilité quotidienne est estimée entre 3% et 5%) (Bader et al. 2005; Compher et al. 2006) pourrait être plus importante que l'effet du statut hormonal (Kuikman et al. 2024; Löfberg et al. 2024).

Au cours de l'exercice de marche de faible intensité réalisé à jeun (choisi pour favoriser l'utilisation des lipides), aucune variation de la DEE n'a été observée entre les phases du cycle menstruel. En revanche, une augmentation de l'oxydation des glucides a été observée en phase lutéale comparativement à la phase folliculaire chez les athlètes HC-. Ce résultat, observé pour la première fois, est contradictoire avec de précédentes études (Zderic et al. 2001; Suh et al. 2002; Vaiksaar et al. 2011b). Cette divergence pourrait être attribuée à des différences méthodologiques, et notamment aux sous-phases du cycle menstruel testées. Dans notre étude, les athlètes ont parfois été évaluées dans des sous-phases différentes du cycle menstruel (milieu ou fin folliculaire ; début, milieu ou fin lutéale), au cours desquelles les concentrations en E2 et P4 varient considérablement et rapidement (Allen et al. 2016; Prado et al. 2024). Des études antérieures chez des femmes non-athlètes ont mis en évidence que de l'E2 augmenterait l'utilisation des lipides et réduirait l'utilisation des glucides au repos comme à l'exercice d'endurance d'intensité modérée (Hackney 1999; Zderic et al. 2001). Par ses actions anti-estrogéniques, la P4 induirait quant à elle une augmentation de l'utilisation des glucides (Beidleman et al. 2002). En théorie, une athlète testée en fin de phase folliculaire, au moment du pic d'E2, pourrait ainsi présenter une oxydation des lipides plus importante que celle testée en milieu de phase folliculaire, avec des taux d'E2 plus faibles. Par conséquent, le rapport E2/P4 a été identifié comme un facteur clé dans la modulation des effets du cycle menstruel sur l'utilisation des substrats énergétiques, car il permet de refléter les fluctuations continues des hormones ovariennes tout au long du cycle menstruel (D'Eon et al. 2005; Hackney 2021). Par ailleurs, bien qu'elle puisse, en partie, être expliquée par les sous-phases dans lesquelles les athlètes ont été testées, la variabilité inter-individuelle des réponses entre les phases folliculaire et lutéale observée dans notre étude souligne

l'importance de considérer les résultats de manière individualisée chez les athlètes, comme le propose par exemple l'étude de Ihaleinen et al. (Ihalainen et al. 2021).

La comparaison entre les athlètes HC+ et HC- suggère que l'utilisation d'une contraception hormonale, en l'occurrence une contraception orale dans notre étude, n'aurait pas d'influence significative sur la DEE ni sur l'oxydation des substrats énergétiques dans le cadre d'un exercice de très faible intensité. Ces observations corroborent celles de précédentes études et méta-analyses réalisées chez des femmes inactives et actives non sportives pour des efforts modérés prolongés (≥ 20 min, $\leq 70\% \dot{V}O_{2max}$) (Eck et al. 1997; Jensen and Levine 1998; Devries et al. 2006; Ortega-Santos et al. 2018). Toutefois, une étude antérieure de notre équipe avait révélé que les femmes sous contraception orale combinée présentaient un taux maximal d'oxydation des lipides supérieur, atteint à une intensité d'exercice plus élevée par rapport à leurs homologues HC- (Isacco et al. 2015). Notre étude est la première à avoir mesuré le coût énergétique à l'exercice en fonction du statut hormonal ovarien. Les résultats ont révélé que le coût énergétique net relatif à la MNG était plus élevé au cours de la marche chez les athlètes HC+ par rapport aux athlètes HC-, ce qui indique une demande énergétique plus importante pour un effort similaire. Cela suggère une moindre efficacité énergétique pour les activités physiques de la vie quotidienne et/ou des exercices de faible intensité chez les athlètes sous contraception orale, et questionne sur les réponses à des exercices d'intensités modérées à élevées, qui sont représentatifs de leur planification d'entraînement. Par conséquent, des stratégies d'entraînement spécifiques pourraient être proposées en fonction du statut hormonal pour optimiser les adaptations à l'entraînement.

III. Forces et limites

Les participants de l'étude WAVE ont réalisé un cycle de perte et de reprise de poids selon leur propres stratégies individuelles, habituellement utilisées lors des compétitions, reflétant donc les conditions écologiques de ces pratiques. Toutefois, le degré de perte de poids modéré dans cette étude souligne la nécessité d'explorer les adaptations métaboliques et nutritionnelles en réponse à des pertes de poids plus importantes (Nunes et al. 2022b; Isola et al. 2023). De plus, bien que cette étude ait permis d'analyser les réponses à un unique épisode de « *weight cycling* », les effets sur la reprise de MG n'ont pu être observés que sur le court terme. Il est important de noter que la consigne donnée aux athlètes pour la visite expérimentale en fin de reprise de poids correspondait à un retour à leur poids initial tout en restant sur une dynamique de reprise de poids, c'est à dire avant stabilisation

de ce poids sur plus d'une semaine ou avant de commencer une nouvelle phase de perte de poids. Cette approche a donc limité l'observation d'un potentiel « *weight overshoot* ». Bien que certains athlètes aient repris plus de poids que la période initiale, d'autres étaient sur le point de débiter un nouvel épisode de variations de poids pour une prochaine compétition et n'avaient donc pas repris la totalité de leur poids initial. Cette limite, ainsi que les prévalences de surpoids, obésité et de troubles cardio-métabolique observées chez des individus non sportifs ayant connu une succession de pertes et reprises de poids (Kajioka et al. 2002), soulignent la nécessité d'interroger les effets du « *weight cycling* » à plus long terme et la répétition de ces épisodes chez les athlètes concernés.

Bien que les influences du type de sport et du sexe aient été analysés séparément dans nos études, le nombre de participants par sous-groupe était insuffisant pour évaluer l'interaction « type de sport x sexe » et discriminer les résultats de manière optimale (c'est-à-dire 36 hommes et 36 femmes pour la totalité de l'étude, avec 12 hommes et 12 femmes pratiquant un sport de combat, de force et d'endurance, respectivement). Néanmoins, au-delà des sports à catégories de poids, majoritairement étudiés sur cette thématique du « *weight cycling* » (Bagot et al. 2024), l'inclusion d'athlètes pratiquant des sports d'endurance constitue une force de ce travail de thèse. Cette population, bien que peu étudiée, est également soumise à des variations de poids. Bien que ces fluctuations soient plus modestes, elles pourraient néanmoins augmenter le risque de « *catch-up fat* » en raison des caractéristiques spécifiques de répartition entre MG et MNG (« *lean fat energy partitioning* ») chez ces athlètes. De la même manière, l'influence de la prise de contraception sur les adaptations métaboliques et nutritionnelles en réponse à cet épisode de « *weight cycling* » (athlètes HC+ versus HC-) avait été envisagé. Cependant, les visites expérimentales ayant été prioritairement planifiées en fonction du poids ciblé pour le protocole de l'étude WAVE, il n'a pas été possible de contrôler les phases du cycle menstruel dans lesquelles les athlètes HC- ont été testées, ce qui pourrait avoir influencé les résultats (Benton et al. 2020; Rogan and Black 2022).

L'étude CAT Women s'est distinguée en étant la première à explorer l'influence du statut hormonal ovarien en considérant les trois composantes de la dépense énergétique (repos à jeun, post-prandial et exercice) chez des athlètes féminines durant une période de haute charge d'entraînement. Toutefois, le nombre inégal de participantes entre les groupes HC+ (n = 9) et HC- (n = 23), ainsi que les différences de composition corporelle, ont pu influencer les résultats obtenus.

L'absence de dosages sanguins constitue une limite majeure de l'étude CAT Women, car elle n'a pas permis de vérifier les concentrations plasmatiques des hormones ovariennes, la présence de cycles ovulatoires, ou l'absence de déficience de la phase lutéale (Elliott-Sale 2023). Néanmoins, en raison des contraintes sportives, économiques et logistiques, des méthodes non invasives ont été employées pour déterminer le statut hormonal ovarien des athlètes. Cette approche a combiné l'utilisation du

questionnaire Answ'Her, la « méthode calendaire » et la réalisation de dosages salivaires pour l'E2 et la P4.

IV. Conclusions et Perspectives

Finalement, l'étude WAVE n'a pas mis en évidence de « *fat overshoot* », ni de modification de la dépense d'énergie ou de suralimentation en réponse à une perte et reprise de poids modérées chez les athlètes habitués au « *weight cycling* ». Le degré de perte de poids modéré, le maintien d'un haut niveau d'activité physique, ainsi qu'un contrôle conscient et maîtrisé de la prise alimentaire tout au long de l'épisode de « *weight cycling* » pourraient expliquer ces résultats à court terme. Toutefois, il serait pertinent d'examiner des athlètes réalisant des pertes de poids plus importantes et/ou suivre plusieurs épisodes de variations de poids afin d'analyser les effets à moyen et long terme de ces pratiques. En effet, les résultats suggèrent un risque de « *catch-up fat* », particulièrement chez les athlètes d'endurance, ce qui souligne la nécessité de mener des études supplémentaires sur cette population. De plus, l'utilisation des substrats énergétiques et le « *food reward* » modifiés à l'issue de la perte et reprise de poids, ainsi que le risque accru de troubles du comportement alimentaire chez les athlètes pratiquant des sports de combat et les athlètes féminines, pourraient contribuer à un risque de « *weight et/ou fat overshoot* » à long terme. Dans l'ensemble, ces résultats soulignent l'importance de mieux comprendre les effets durables du « *weight cycling* ». Ils appellent à une meilleure sensibilisation des athlètes, ainsi que de leur entourage sportif et médical, sur ces pratiques.

Les futures analyses de nos résultats permettront d'étudier : i) les associations entre les cinétiques de variations de poids et de composition corporelle avec les adaptations métaboliques et nutritionnelles, qui pourraient éclairer certaines observations (par exemple, la relation entre la déplétion de MG avec la quantité de MG reprise, la dépense d'énergie, l'utilisation des substrats, ou encore le « *food reward* ») ; et ii) les conséquences d'un épisode de « *weight cycling* » sur les capacités physiques des athlètes, telles que la force, l'endurance et la perception de l'effort.

Enfin, bien qu'aucun dimorphisme sexuel apparent n'ait été observé, la littérature ainsi que nos résultats suggèrent la nécessité de recherches supplémentaires sur l'impact du statut hormonal dans les adaptations au « *weight cycling* » chez les athlètes. En effet, la revue de littérature a mis en évidence la potentielle influence du statut hormonal (sexe, prise de contraception hormonale, cycle menstruel) sur les modifications de la composition corporelle, les adaptations énergétiques et la régulation de la prise alimentaire lors d'une perte de poids chez des individus non sportifs, comme

chez des athlètes (**Chapitre I**). La MG plus faible des athlètes masculins pourrait induire une perte de MNG plus importante que chez les femmes durant la perte de poids, les exposant ainsi à un risque accru de « *catch-up fat* » à long terme (Isola et al. 2023). Par ailleurs, indépendamment de toute variation de poids, les athlètes féminines ont montré un risque plus élevé de comportements hyperphagiques par rapport aux hommes dans notre étude (**Axe I, Étude 3**). Selon la littérature, ce comportement pourrait être exacerbé par l'utilisation d'une contraception hormonale dans un contexte de perte de poids (Arnoni-Bauer et al. 2017; Klump and Di Dio 2022). De plus, certaines études ont souligné une utilisation plus importante des lipides et une préférence pour les aliments sucrés pendant la phase lutéale du cycle menstruel chez des femmes actives, comparativement à la phase folliculaire (Hackney et al. 1994; Malo-Vintimilla et al. 2024). Ce constat pourrait entraîner une reprise de MG plus importante si la reprise de poids se produit en phase folliculaire. Ainsi, des études et analyses supplémentaires permettraient de mieux comprendre l'influence du sexe, de la contraception hormonale et du cycle menstruel sur le « *weight cycling* », afin d'affiner les recommandations et de prévenir les risques liés à ces pratiques chez les athlètes, en tenant compte des spécificités hormonales de chaque individu.

D'après l'étude CAT Women, le statut hormonal ovarien ne semble pas influencer la dépense d'énergie ni l'utilisation des substrats énergétiques au repos, à jeun comme en condition post-prandiale, chez les athlètes féminines en période de haute charge d'entraînement. Cependant, l'utilisation d'une contraception orale réduirait l'efficacité énergétique lors d'un exercice de marche à faible intensité, comparable à des efforts quotidiens, questionnant les effets à des intensités plus élevées. De plus, l'influence du cycle menstruel sur l'utilisation des substrats énergétiques, illustrée par une utilisation des glucides plus importante en phase lutéale par rapport à la phase folliculaire, suggère la nécessité d'adapter les charges d'entraînement et/ou les stratégies de récupération en fonction du statut hormonal des athlètes.

Dans le cadre de ce suivi de cohorte, de futures analyses de nos données permettront d'examiner l'influence de l'interaction entre le statut hormonal ovarien et la charge d'entraînement chez ces athlètes, en comparant les résultats obtenus lors de la période de haute charge d'entraînement avec ceux observés en faible charge. Il serait également pertinent d'étendre cette étude à l'ensemble de la population féminine, en tenant compte des différents niveaux d'activité physique (actives/inactives/sportives). En effet, il est bien établi que le niveau d'activité physique et les comportements sédentaires influencent la dépense énergétique au repos et à l'exercice (Blundell et

al. 2015; Beaulieu et al. 2017; Ennequin et al. 2023), soulignant l'importance de considérer ce paramètre individuel comme un facteur clé de la régulation énergétique inter- et intra-individuelle.

Les résultats obtenus ont également permis de sensibiliser l'encadrement sportif et les athlètes impliquées dans ce protocole en leur fournissant des conseils sur la nutrition et la planification de l'entraînement. De plus, l'identification des symptômes prémenstruels et menstruels, perçus par les athlètes comme des facteurs limitant la pratique sportive et la performance (**Axe II, Étude 1**), ainsi que les données issues des relevés alimentaires, ont permis d'envisager des solutions agroalimentaires adaptées aux besoins énergétiques et nutritionnels des athlètes féminines. Dans ce contexte, un projet de développement de produits végétaux innovants est en cours. Ces produits visent à répondre aux besoins en macro- (protéines, lipides, glucides) et micronutriments (vitamines et minéraux) des athlètes féminines, tout en satisfaisant les exigences énergétiques liées à leur haut niveau d'activité physique. Réalisé en collaboration avec l'entreprise Nutrifizz® à travers le programme SportVeg', ce projet vise également à limiter l'apparition de SPM et SM, tout en améliorant le bien-être physique et mental des athlètes féminines.

CONCLUSION GÉNÉRALE DU PROJET DE THÈSE

Ce projet de thèse a apporté de nouvelles connaissances sur les adaptations énergétiques dans la population athlète, dans un contexte de variations de poids ou en fonction du statut hormonal ovarien. Les résultats, à travers différents axes de travail, ont notamment permis de :

- i) **Axe I** : Révéler que les réponses métaboliques et nutritionnelles en réponse à un cycle de perte et de reprise de poids modéré ne semblent pas induire de reprise de masse grasse excessive sur le court terme. Les différences observées suggèrent cependant un risque de reprise de masse grasse à plus long terme, spécifiquement chez les athlètes d'endurance, et le développement de troubles alimentaires chez les femmes et les athlètes pratiquant un sport de combat.
- ii) **Axe II** : Développer un outil adapté aux conditions de terrain permettant de caractériser le statut hormonal ovarien, les symptômes associés et les variations de poids. Prendre en considération les limitations méthodologiques quant à l'étude du statut hormonal ovarien dans la recherche sur le métabolisme énergétique.
- iii) **Axe III** : Mettre en avant l'influence du statut hormonal ovarien (phases du cycle menstruel et utilisation d'une contraception orale) sur le métabolisme énergétique à l'exercice, mais pas au repos, chez des athlètes en période de haute charge d'entraînement. Sensibiliser et apporter des conseils nutritionnels et de planification de l'entraînement auprès de l'encadrement sportif et d'athlètes de niveau national et international issus de clubs locaux. Initier le développement d'un produit alimentaire innovant en réponse aux besoins énergétiques des athlètes féminines pour limiter l'apparition de symptômes relatifs à leur statut hormonal.

Alors que la recherche actuelle semble focalisée sur les aptitudes physiques en lien avec la performance des athlètes, la prise en considération de leur santé physique et mentale constitue un paramètre clé de cette performance. Ainsi, le domaine de recherche portant sur des adaptations énergétiques, qu'elles soient en fonction des variations de poids ou du statut hormonal ovarien, nécessite encore d'être exploré pour contribuer à la santé des athlètes (actuelle et future), dont la santé reproductive des athlètes féminines, et optimiser leur performance sportive.

**CONTRIBUTIONS PERSONNELLES ET
VALORISATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE**

I. Publications scientifiques

Relatives à la thèse

Bagot S, Pereira B, Lambert C, Fournier E, Chauséaume Bussière E, Dutheil F, Miles-Chan J, Thivel D, Duclos M, Isacco L. Ovarian hormonal status may impact exercise but not resting or postprandial metabolism in high training load period athletes. (*À soumettre*).

Bagot S, Ramos I, Miles-Chan J, Dulloo A, Hackney AC, Boirie Y, Duclos M, Thivel D, Isacco L. The type of sport, but not sex, impacts body composition and metabolic response to a complete weight loss – weight regain episode in weight cycling athletes. Results from the WAVE study. (*En révision dans Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*).

Bagot S, Ramos I, Hackney AC, Finlayson G, Fournier E, Boirie Y, Isacco L, Thivel D. Appetite control and eating behavior traits might not be impacted by a single weight cycling episode in weight-cycling athletes. Results of the WAVE study. (*En révision dans International Journal of Sports Physiology and Performance*).

Bagot S, Miles-Chan J, Duclos M, Isacco L. Female Exercise Metabolism: Quality assessment of existing knowledge base and key challenges in study design. (*En révision dans International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*).

Bagot S, Pereira B, Miles-Chan J, Gryson C, Chanséaume Bussière E, Duclos M, Thivel D, Isacco L. The habitual degree of weight loss might be associated with specific fat and protein intakes during a period of weight maintenance in athletes used to weight variations: preliminary results from the WAVE study. *Nutrition Research*. 2024. ISSN 0271-5317. doi : 10.1016/j.nutres.2024.07.009.

Bagot S, Pereira B, Lambert C, Pelissier L, Chanséaume E, Duclos M, Hackney AC, Elliott-Sale KJ, Thivel D, Isacco L. A reproducible, self-reported, field-based tool for monitoring ovarian hormone status and body weight variations in female athletes: the Answ'Her questionnaire. *J Sports Med Phys Fitness*. 2024 Jun 18. doi: 10.23736/S0022-4707.24.15879-3. Epub ahead of print. PMID: 38888562.

Bagot S, Pélissier L, Pereira B, Chanséaume Bussière E, Duclos M, Dulloo A, Miles-Chan J, Charlot K, Boirie Y, Thivel D, Isacco L. Weight regain, body composition, and metabolic responses to weight loss in weight cycling athletes: A systematic review and meta-analyses. *Obes Rev*. 2024 Feb;25(2):e13658. doi: 10.1111/obr.13658. Epub 2023 Dec 14. PMID: 38096860. (**Annexe 2**).

Non relatives à la thèse

Pélissier L, **Bagot S**, Miles-Chan JL, Pereira B, Boirie Y, Duclos M, Dulloo A, Isacco L, Thivel D. Is dieting a risk for higher weight gain in normal-weight individual? A systematic review and meta-analysis. *Br J Nutr*. 2023 Jan 16;126(1):1-23. doi: 10.1017/S0007114523000132. Epub ahead of print. PMID: 36645258. (**Annexe 1**).

Fillon A, Fearnbach N, Vieira S, Gélinier J, **Bagot S**, Bailly M, Boscaro A, Pélissier L, Siroux J, Grasteau V, Bertsch J, Pereira B, Duclos M, Lambert C, Thivel D. Changes in Sedentary Time and Implicit Preference for Sedentary Behaviors in Response to a One-Month Educational Intervention in Primary School Children: Results from the Globe Trotter Pilot Cluster-Randomized Study. *Int J Environ Res Public Health*. 2023 Jan 7;20(2):1089. doi: 10.3390/ijerph20021089. PMID: 36673845; PMCID: PMC9859473.

Fillon A, Pélissier L, Beaulieu K, Charlot K, Siroux J, **Bagot S**, Bailly M, Boscaro A, Finlayson G, Boirie Y, Duclos M, Isacco L, Pereira B, Julian V, Thivel D. Dietary- but not exercise-induced acute iso-energetic

deficit result in short-term appetitive compensatory responses in adolescents with obesity. *Appetite*. 2023 Feb 1;181:106401. doi: 10.1016/j.appet.2022.106401. Epub 2022 Dec 5. PMID: 36473580.

Pélissier L, Ennequin G, **Bagot S**, Pereira B, Lachèze T, Duclos M, Thivel D, Miles-Chan J, Isacco L. Lightest weight-class athletes are at higher risk of weight regain: results from the French-Rapid Weight Loss Questionnaire. *Phys Sportsmed*. 2023 Apr;51(2):144-152. doi: 10.1080/00913847.2021.2014285. Epub 2022 Jan 5. PMID: 34875202.

Guyot E, Dougkas A, Nazare JA, **Bagot S**, Disse E, Iceta S. A systematic review and meta-analyses of food preference modifications after bariatric surgery. *Obes Rev*. 2021 Oct;22(10):e13315. doi: 10.1111/obr.13315. Epub 2021 Jul 26. PMID: 34312976.

II. Communications

Communications orales

Congrès internationaux

Bagot S, Fournier E, Beraud D, Chanseume E, Duclos M, Thivel D, Isacco L. Energetic and nutritional adaptations to weight loss and regain in weight cycling athletes. Preliminary results of the WAVE study. International Workshop of Human appetite control, movement behavior and weight variations. Aubière, FRANCE. 6 novembre 2023.

Bagot S, Pélissier L, Fournier E, Beraud D, Chanseume E, Duclos M, Thivel D, Isacco L. Is there a sexual dimorphism in metabolic responses to weight loss and regain in weight cycling athletes? The WAVE study. International Workshop Female Physiology and Metabolism. Aubière, FRANCE. 10 mai 2023.

Congrès nationaux

Bagot S, Pélissier L, Fournier E, Beraud D, Chanseume E, Duclos M, Thivel D, Isacco L. Is there a sexual dimorphism in metabolic responses to weight loss and regain in weight cycling athletes? The WAVE study. Journées de l'Ecole Doctorale. Clermont-Ferrand, France. 6 juin 2023.

Posters

Congrès nationaux

Bagot S, Fournier E, Beraud D, Chanseume E, Duclos M, Thivel D, Isacco L. Les adaptations métaboliques aux variations de poids et de composition corporelle chez les sportifs masculins et féminins. *E-Poster commenté*. Journées Francophones de Nutrition. Marseille, FRANCE. 7 décembre 2023.

Bagot S, Pélissier L, Pereira B, Chanseume Bussiere E, Duclos M, Thivel D, Isacco L. Resting and exercise metabolism adaptations to weight cycling in athletes. *Poster affiché*. Journée Scientifique du Centre International de la Recherche 3. Aubière, France. 21 novembre 2022.

III. Médiation et vulgarisation scientifique

Médiation scientifique

Concours de « Ma thèse en 180 secondes »

Finale régionale, Clermont-Ferrand, 11 mars 2024 : *Lauréate du « Premier prix du jury » et du « Prix des lycéens »*. https://www.youtube.com/watch?v=kK_PPue-cDE&t=137s

Demi-finale nationale, Paris, 29 mars 2024. *Qualification pour la finale nationale*.

Finale nationale, Nice, 5 juin 2024. <https://www.youtube.com/watch?v=KW6VkXD44PA>

Autres

Journées de la Science. Présentation du sujet de thèse et du parcours doctoral. CREPS de Vichy, France. 2 octobre 2023.

Présentation des bases de la nutrition sportive aux entraîneurs et athlètes ayant participé à l'étude CAT Women. Saison sportive 2021-2022 et 2022-2023.

Articles de presse et vulgarisation scientifique

Le Connecteur. « Cycle menstruel et performance des sportives ». 17 juin 2024. <https://leconnecteur.org/cycle-menstruel-et-performance-des-sportives/>

France 3 Auvergne. « Quand la science s'intéresse au tabou des menstruations des sportives ». 13 Juin 2024. <https://france3-regions.francetvinfo.fr/auvergne-rhone-alpes/puy-de-dome/clermont-ferrand/quand-la-science-s-interesse-au-tabou-des-menstruations-des-sportives-2985989.html>

Bagot S. The Conversation France. « Cycle menstruel et contraception hormonale : quel impact sur les sportives ? ». 4 juin 2024. <https://theconversation.com/cycle-menstruel-et-contraception-hormonale-quel-impact-sur-les-sportives-230148>

IV. Applications agro-alimentaires (via Nutrifizz)

Presse agro-alimentaire

Bagot S (Nutrifizz). « Nutrition de la femme sportive : Mieux prendre en compte les besoins spécifiques pour développer des produits innovants ». *Le Focus Scientifique*. Protéines & Nutrition. N°2, avril 2024. <https://66laboetie.net/file/download?p=eJxUdHezUr4Q7aDLjk%2FDyqB1vsidyR%2F%2B9LFCASaXxOTiAd1fmRQJ5fCcTwJopy%2FrjxO8VJ0rJW3cvZwOHfQq1iTmu9nuP%2B2aBpLm%2FTqrj40%3D>

Bagot S (Nutrifizz). « La nutrition sportive au féminin : un marché à ne pas négliger ». IngréBio Web-magazine & Expertise ingrédients bio. 2023 Jun 9. <https://ingrebio.fr/2023/06/09/nutrition-sportive-au-feminin-marche-a-ne-pas-negliger/>

Webinaire et formations certifiées QUALIOPI

Webinaire :

Bagot S (Nutrifizz). Vegepollys Valley et Innov'Alliance. « Webinaire nutrition spécialisée : le végétal et le marché segmenté de la nutrition féminine ». 8 mars 2024.

Formations certifiées QUALIOPI :

Nutrifizz. Formation Nutrition Sportive, certifiée QUALIOPI. Lyon, France. 27 juin 2024.

Nutrifizz. Formation Nutrition Sportive, certifiée QUALIOPI. Cébazat, France. 29 juin 2023.

Dossier/Livre blanc :

Nutrifizz. Dossier Nutrition Sportive. Juillet 2022.

Applications agro-industrielles

Projet SportVeg' (Nutrifizz). Projet de recherche et développement d'un produit alimentaire végétal innovant en réponse aux besoins nutritionnels des sportives identifiés dans les résultats des études Answ'Her et CAT Women.

V. Apparitions additionnelles

Le Parisien Etudiant. Reportage. « "Ce genre d'événements permet de montrer que ce qu'on fait est utile" : la science, grande gagnante de la finale de Ma thèse en 180 secondes ». 6 Juin 2024. <https://www.leparisien.fr/etudiant/etudes/universites/ce-genre-devenements-permet-de-montrer-que-ce-quon-fait-est-utile-la-science-grande-gagnante-de-la-finale-de-ma-these-en-180-secondes-SXE6FUGHSJERBHWMRVFXFVTERU.php>

L'Etudiant. Rubrique portrait. « Sarah, doctorante et finaliste de MT180 : "J'aime ce côté enquête" ». 13 mai 2024. <https://www.letudiant.fr/lifestyle/vous-faites-l-actu/article/sarah-doctorante-et-finaliste-de-mt180-jaime-ce-cote-enquete.html>

BIBLIOGRAPHIE

- Achten, J., Gleeson, M., and Jeukendrup, A.E. 2002. Determination of the exercise intensity that elicits maximal fat oxidation. *Med Sci Sports Exerc* **34**(1): 92–97. doi:10.1097/00005768-200201000-00015.
- van Aggel-Leijssen, D.P., Saris, W.H., Hul, G.B., and van Baak, M.A. 2001. Short-term effects of weight loss with or without low-intensity exercise training on fat metabolism in obese men. *The American Journal of Clinical Nutrition* **73**(3): 523–531. doi:10.1093/ajcn/73.3.523.
- Alajmi, N., Deighton, K., King, J.A., Reischak-Oliveira, A., Wasse, L.K., Jones, J., Batterham, R.L., and Stensel, D.J. 2016. Appetite and Energy Intake Responses to Acute Energy Deficits in Females versus Males. *Med Sci Sports Exerc* **48**(3): 412–420. doi:10.1249/MSS.0000000000000793.
- Allen, A.M., McRae-Clark, A.L., Carlson, S., Saladin, M.E., Gray, K.M., Wetherington, C.L., McKee, S.A., and Allen, S.S. 2016. Determining menstrual phase in human biobehavioral research: A review with recommendations. *Exp Clin Psychopharmacol* **24**(1): 1–11. doi:10.1037/pha0000057.
- Allen, T.E., Smith, D.P., and Miller, D.K. 1977. Hemodynamic response to submaximal exercise after dehydration and rehydration in high school wrestlers. *Med Sci Sports* **9**(3): 159–163.
- Alwan, N., Moss, S.L., Elliott-Sale, K.J., Davies, I.G., and Enright, K. 2019. A Narrative Review on Female Physique Athletes: The Physiological and Psychological Implications of Weight Management Practices. *International Journal of Sport Nutrition & Exercise Metabolism* **29**(6): 682–689.
- Amand, G., and Plu-Bureau, G. 2020. Contraception et traitements hormonaux en gynécologie. *La Presse Médicale Formation* **1**(1): 42–51. doi:10.1016/j.lpmfor.2020.03.017.
- Amin, Z., Canli, T., and Epperson, C.N. 2005. Effect of estrogen-serotonin interactions on mood and cognition. *Behav Cogn Neurosci Rev* **4**(1): 43–58. doi:10.1177/1534582305277152.
- Ampatzis, C., Zervoudis, S., Iatrakis, G., and Mastorakos, G. 2022. Effect of oral contraceptives on bone mineral density. *Acta Endocrinol (Buchar)* **18**(3): 355–360. doi:10.4183/aeb.2022.355.
- Anastasiou, C.A., Yannakoulia, M., Pirogianni, V., Rapti, G., Sidossis, L.S., and Kavouras, S.A. 2010. Fitness and weight cycling in relation to body fat and insulin sensitivity in normal-weight young women. *J Am Diet Assoc* **110**(2): 280–284. doi:10.1016/j.jada.2009.10.040.
- Andersen, R.E., Barlett, S.J., Morgan, G.D., and Brownell, K.D. 1995. Weight loss, psychological, and nutritional patterns in competitive male body builders. *Int J Eat Disord* **18**(1): 49–57. doi:10.1002/1098-108x(199507)18:1<49::aid-eat2260180106>3.0.co;2-c.
- Arnoni-Bauer, Y., Bick, A., Raz, N., Imbar, T., Amos, S., Agmon, O., Marko, L., Levin, N., and Weiss, R. 2017. Is It Me or My Hormones? Neuroendocrine Activation Profiles to Visual Food Stimuli Across the Menstrual Cycle. *J Clin Endocrinol Metab* **102**(9): 3406–3414. doi:10.1210/jc.2016-3921.
- Artioli, G.G., Franchini, E., Kashiwagura, D.B., Solis, M.Y., Mendes, S.H., and Lancha Junior, A.H. 2011. Rapid Weight Loss Is Highly Prevalent Among Young Judo Competitors. *Medicine & Science in Sports & Exercise* **43**: 472–473.
- Artioli, G.G., Gualano, B., Franchini, E., Scagliusi, F.B., Takesian, M., Fuchs, M., and Lancha, A.H. 2010. Prevalence, magnitude, and methods of rapid weight loss among judo competitors. *Med Sci Sports Exerc* **42**(3): 436–442. doi:10.1249/MSS.0b013e3181ba8055.
- Attia, E., and Walsh, T. 2022. Troubles du comportement alimentaire - Troubles psychiatriques. Available from <https://www.msmanuals.com/fr/professional/troubles-psychiatriques/troubles-du-comportement-alimentaire/hyperphagie-boulimique> [accessed 6 August 2024].
- Bader, N., Bosy-Westphal, A., Dilba, B., and Müller, M.J. 2005. Intra- and interindividual variability of resting energy expenditure in healthy male subjects -- biological and methodological variability of resting energy expenditure. *Br J Nutr* **94**(5): 843–849. doi:10.1079/bjn20051551.
- Bagot, S., Péliissier, L., Pereira, B., Chanséaume Bussiere, E., Duclos, M., Dulloo, A., Miles-Chan, J., Charlot, K., Boirie, Y., Thivel, D., and Isacco, L. 2024. Weight regain, body composition, and metabolic responses to weight loss in weight cycling athletes: A systematic review and meta-analyses. *Obes Rev* **25**(2): e13658. doi:10.1111/obr.13658.

- Bailey, S.P., Zacher, C.M., and Mittleman, K.D. 2000. Effect of menstrual cycle phase on carbohydrate supplementation during prolonged exercise to fatigue. *J Appl Physiol* (1985) **88**(2): 690–697. doi:10.1152/jappl.2000.88.2.690.
- Baumgartner, S., Bitterlich, N., Geboltsberger, S., Neuenschwander, M., Matter, S., and Stute, P. 2023. Contraception, female cycle disorders and injuries in Swiss female elite athletes—a cross sectional study. *Front. Physiol.* **14**. Frontiers. doi:10.3389/fphys.2023.1232656.
- Beaulieu, K., Hopkins, M., Blundell, J., and Finlayson, G. 2017. Impact of physical activity level and dietary fat content on passive overconsumption of energy in non-obese adults. *Int J Behav Nutr Phys Act* **14**(1): 14. doi:10.1186/s12966-017-0473-3.
- Beaulieu, K., Hopkins, M., Blundell, J., and Finlayson, G. 2018. Homeostatic and non-homeostatic appetite control along the spectrum of physical activity levels: An updated perspective. *Physiol Behav* **192**: 23–29. doi:10.1016/j.physbeh.2017.12.032.
- Beaulieu, K., Oustric, P., and Finlayson, G. 2020. The Impact of Physical Activity on Food Reward: Review and Conceptual Synthesis of Evidence from Observational, Acute, and Chronic Exercise Training Studies. *Curr Obes Rep* **9**(2): 63–80. doi:10.1007/s13679-020-00372-3.
- Beidleman, B.A., Rock, P.B., Muza, S.R., Fulco, C.S., Gibson, L.L., Kamimori, G.H., and Cymerman, A. 2002. Substrate oxidation is altered in women during exercise upon acute altitude exposure. *Med Sci Sports Exerc* **34**(3): 430–437. doi:10.1097/00005768-200203000-00008.
- Belo, N.O., Sairam, M.R., and Dos Reis, A.M. 2008. Impairment of the natriuretic peptide system in follitropin receptor knockout mice and reversal by estradiol: implications for obesity-associated hypertension in menopause. *Endocrinology* **149**(3): 1399–1406. doi:10.1210/en.2007-0572.
- Bemben, D.A., Boileau, R.A., Bahr, J.M., Nelson, R.A., and Misner, J.E. 1992. Effects of oral contraceptives on hormonal and metabolic responses during exercise. *Med Sci Sports Exerc* **24**(4): 434–441.
- Benoist, H.M., Schutter, D., Arabas, J.L., and Mayhew, J.L. 2014. Variation in Body Weight and Hydration Level of College Wrestlers During and After a Competitive Season. *Missouri J Health Phys Educ Recreat Dance* **24**.
- Benton, M.J., Hutchins, A.M., and Dawes, J.J. 2020. Effect of menstrual cycle on resting metabolism: A systematic review and meta-analysis. *PLoS One* **15**(7): e0236025. doi:10.1371/journal.pone.0236025.
- Blanchet, C., Mathieu, M.-È., St-Laurent, A., Fecteau, S., St-Amour, N., and Drapeau, V. 2018. A Systematic Review of Physical Activity Interventions in Individuals with Binge Eating Disorders. *Curr Obes Rep* **7**(1): 76–88. doi:10.1007/s13679-018-0295-x.
- Blode, H., Kowal, K., Roth, K., and Reif, S. 2012. Pharmacokinetics of drospirenone and ethinylestradiol in Caucasian and Japanese women. *Eur J Contracept Reprod Health Care* **17**(4): 284–297. doi:10.3109/13625187.2012.677076.
- Blundell, J.E., Caudwell, P., Gibbons, C., Hopkins, M., Näslund, E., King, N.A., and Finlayson, G. 2012. Body composition and appetite: fat-free mass (but not fat mass or BMI) is positively associated with self-determined meal size and daily energy intake in humans. *Br J Nutr* **107**(3): 445–449. doi:10.1017/S0007114511003138.
- Blundell, J.E., Gibbons, C., Beaulieu, K., Casanova, N., Duarte, C., Finlayson, G., Stubbs, R.J., and Hopkins, M. 2020. The drive to eat in homo sapiens: Energy expenditure drives energy intake. *Physiol Behav* **219**: 112846. doi:10.1016/j.physbeh.2020.112846.
- Blundell, J.E., Gibbons, C., Caudwell, P., Finlayson, G., and Hopkins, M. 2015. Appetite control and energy balance: impact of exercise. *Obes Rev* **16 Suppl 1**: 67–76. doi:10.1111/obr.12257.
- Boisseau, N. 2012. Thème 1. Réduction de la masse grasse et perte de poids : stratégies et risques potentiels pour les athlètes olympiques. *In Nutrition et performance en sport : la science au bout de la fourchette. Edited by C. Hausswirth. INSEP-Éditions, Paris. pp. 169–176. doi:10.4000/books.insep.1205.*

- Bonen, A., Haynes, F.W., and Graham, T.E. 1991. Substrate and hormonal responses to exercise in women using oral contraceptives. *Journal of Applied Physiology* **70**(5): 1917–1927. American Physiological Society. doi:10.1152/jappl.1991.70.5.1917.
- Bosy-Westphal, A., Kossel, E., Goele, K., Later, W., Hitze, B., Settler, U., Heller, M., Glüer, C.-C., Heymsfield, S.B., and Müller, M.J. 2009. Contribution of individual organ mass loss to weight loss-associated decline in resting energy expenditure. *Am J Clin Nutr* **90**(4): 993–1001. doi:10.3945/ajcn.2008.27402.
- Bouchard, T., Yong, P., and Doyle-Baker, P. 2023. Establishing a Gold Standard for Quantitative Menstrual Cycle Monitoring. *Medicina (Kaunas)* **59**(9): 1513. doi:10.3390/medicina59091513.
- Bratland-Sanda, S., and Sundgot-Borgen, J. 2013. Eating disorders in athletes: overview of prevalence, risk factors and recommendations for prevention and treatment. *Eur J Sport Sci* **13**(5): 499–508. doi:10.1080/17461391.2012.740504.
- Bredella, M.A. 2017. Sex Differences in Body Composition. *In Sex and Gender Factors Affecting Metabolic Homeostasis, Diabetes and Obesity. Edited by F. Mauvais-Jarvis.* Springer International Publishing, Cham. pp. 9–27. doi:10.1007/978-3-319-70178-3_2.
- Brewer, P.E. 1992. Weight cycling in competitive judokas. University of British Columbia. doi:10.14288/1.0086677.
- Brito, C.J., Roas, A.F.C.M., Brito, I.S.S., Marins, J.C.B., Cãrdova, C., and Franchini, E. 2012. Methods of Body-Mass Reduction by Combat Sport Athletes. *International Journal of Sport Nutrition & Exercise Metabolism* **22**(2): 89–97.
- Brito, V.N., and Latronico, A.C. 2015. Puberty: When is it normal? *Arch. Endocrinol. Metab.* **59**: 93–94. Sociedade Brasileira de Endocrinologia e Metabologia. doi:10.1590/2359-3997000000018.
- Brunault, P., Gaillard, P., Ballon, N., Couet, C., Isnard, P., Cook, S., Delbachian, I., Réveillère, C., and Courtois, R. 2016. Validation de la version française de la Binge Eating Scale : étude de sa structure factorielle, de sa consistance interne et de sa validité de construit en population clinique et non clinique. *L'Encéphale* **42**(5): 426–433. doi:10.1016/j.encep.2016.02.009.
- Burton, D.A., Stokes, K., and Hall, G.M. 2004. Physiological effects of exercise. *Continuing Education in Anaesthesia Critical Care & Pain* **4**(6): 185–188. doi:10.1093/bjaceaccp/mkh050.
- Caine, D., Lewis, R., O'Connor, P., Howe, W., and Bass, S. 2001. Does gymnastics training inhibit growth of females? *Clin J Sport Med* **11**(4): 260–270. doi:10.1097/00042752-200110000-00009.
- Calonne, J., Arsenijevic, D., Scerri, I., Miles-Chan, J.L., Montani, J.-P., and Dulloo, A.G. 2019. Low 24-hour core body temperature as a thrifty metabolic trait driving catch-up fat during weight regain after caloric restriction. *Am J Physiol Endocrinol Metab* **317**(4): E699–E709. doi:10.1152/ajpendo.00092.2019.
- Cameron, J.D., Goldfield, G.S., Finlayson, G., Blundell, J.E., and Doucet, E. 2014. Fasting for 24 hours heightens reward from food and food-related cues. *PLoS One* **9**(1): e85970. doi:10.1371/journal.pone.0085970.
- Cameron, J.D., Goldfield, G.S., Riou, M.-È., Finlayson, G.S., Blundell, J.E., and Doucet, É. 2016. Energy depletion by diet or aerobic exercise alone: impact of energy deficit modality on appetite parameters. *Am J Clin Nutr* **103**(4): 1008–1016. doi:10.3945/ajcn.115.115584.
- Campbell, S.E., Angus, D.J., and Febbraio, M.A. 2001. Glucose kinetics and exercise performance during phases of the menstrual cycle: effect of glucose ingestion. *Am J Physiol Endocrinol Metab* **281**(4): E817–25. doi:10.1152/ajpendo.2001.281.4.e817.
- Campbell, S.E., and Febbraio, M.A. 2001. Effect of ovarian hormones on mitochondrial enzyme activity in the fat oxidation pathway of skeletal muscle. *Am J Physiol Endocrinol Metab* **281**(4): E803–808. doi:10.1152/ajpendo.2001.281.4.E803.
- Cano, A., Ventura, L., Martinez, G., Cugusi, L., Caria, M., Deriu, F., and Manca, A. 2022. Analysis of sex-based differences in energy substrate utilization during moderate-intensity aerobic exercise. *Eur J Appl Physiol* **122**(1): 29–70. doi:10.1007/s00421-021-04802-5.

- Cardi, V., Leppanen, J., and Treasure, J. 2015. The effects of negative and positive mood induction on eating behaviour: A meta-analysis of laboratory studies in the healthy population and eating and weight disorders. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* **57**: 299–309. doi:10.1016/j.neubiorev.2015.08.011.
- Casa, D.J., Chevront, S.N., Galloway, S.D., and Shirreffs, S.M. 2019. Fluid Needs for Training, Competition, and Recovery in Track-and-Field Athletes. doi:10.1123/ijsnem.2018-0374.
- Casanova, N., Beaulieu, K., Finlayson, G., and Hopkins, M. 2019. Metabolic adaptations during negative energy balance and their potential impact on appetite and food intake. *Proceedings of the Nutrition Society* **78**(3): 279–289. doi:10.1017/S0029665118002811.
- Casazza, G.A., Jacobs, K.A., Suh, S.-H., Miller, B.F., Horning, M.A., and Brooks, G.A. 2004. Menstrual cycle phase and oral contraceptive effects on triglyceride mobilization during exercise. *J Appl Physiol* (1985) **97**(1): 302–309. doi:10.1152/jappphysiol.00050.2004.
- Celec, P., Ostaniková, D., Skoknová, M., Hodosy, J., Putz, Z., and Kúdela, M. 2009. Salivary Sex Hormones during the Menstrual Cycle. *Endocr J* **56**(3): 521–523. doi:10.1507/endocrj.K09E-020.
- Chaput, J.-P., Leblanc, C., Pérusse, L., Després, J.-P., Bouchard, C., and Tremblay, A. 2009. Risk Factors for Adult Overweight and Obesity in the Quebec Family Study: Have We Been Barking Up the Wrong Tree? *Obesity* **17**(10): 1964–1970. doi:10.1038/oby.2009.116.
- Cheng, H.L., Griffin, H., Claes, B.E., Petocz, P., Steinbeck, K., Rooney, K., and O'Connor, H. 2014. Influence of dietary macronutrient composition on eating behaviour and self-perception in young women undergoing weight management. *Eating and Weight Disorders* **19**(2): 241–247. doi:10.1007/s40519-014-0110-y.
- Christoffersen, B.Ø., Sanchez-Delgado, G., John, L.M., Ryan, D.H., Raun, K., and Ravussin, E. 2022. Beyond appetite regulation: Targeting energy expenditure, fat oxidation, and lean mass preservation for sustainable weight loss. *Obesity (Silver Spring)* **30**(4): 841–857. doi:10.1002/oby.23374.
- Colditz, G.A., Willett, W.C., Stampfer, M.J., London, S.J., Segal, M.R., and Speizer, F.E. 1990. Patterns of weight change and their relation to diet in a cohort of healthy women. *Am J Clin Nutr* **51**(6): 1100–1105. doi:10.1093/ajcn/51.6.1100.
- Cole, L.A., Ladner, D.G., and Byrn, F.W. 2009. The normal variabilities of the menstrual cycle. *Fertil Steril* **91**(2): 522–527. doi:10.1016/j.fertnstert.2007.11.073.
- Compher, C., Frankenfield, D., Keim, N., Roth-Yousey, L., and Evidence Analysis Working Group. 2006. Best practice methods to apply to measurement of resting metabolic rate in adults: a systematic review. *J Am Diet Assoc* **106**(6): 881–903. doi:10.1016/j.jada.2006.02.009.
- Congy, J., Rahib, D., Leroy, C., Bouyer, J., and de La Rochebrochard, E. 2024. Contraceptive Use Measured in a National Population-Based Approach: Cross-Sectional Study of Administrative Versus Survey Data. *JMIR Public Health Surveill* **10**: e45030. doi:10.2196/45030.
- Conlin, L.A., Aguilar, D.T., Rogers, G.E., and Campbell, B.I. 2021. Flexible vs. rigid dieting in resistance-trained individuals seeking to optimize their physiques: A randomized controlled trial. *J Int Soc Sports Nutr* **18**(1): 52. doi:10.1186/s12970-021-00452-2.
- Constantini, N.W., Dubnov, G., and Lebrun, C.M. 2005. The menstrual cycle and sport performance. *Clin Sports Med* **24**(2): e51-82, xiii–xiv. doi:10.1016/j.csm.2005.01.003.
- Costello, J.T., Bieuzen, F., and Bleakley, C.M. 2014. Where are all the female participants in Sports and Exercise Medicine research? *Eur J Sport Sci* **14**(8): 847–851. doi:10.1080/17461391.2014.911354.
- Coswig, V.S., Miarka, B., Pires, D.A., da Silva, L.M., Bartel, C., and Del Vecchio, F.B. 2019. Weight Regain, but not Weight Loss, Is Related to Competitive Success in Real-Life Mixed Martial Arts Competition. *International Journal of Sport Nutrition & Exercise Metabolism* **29**(1): 1–8.
- Cowley, E., Olenick, A., McNulty, K., and Ross, E. 2021. “Invisible Sportswomen”: The Sex Data Gap in Sport and Exercise Science Research. *Women in Sport and Physical Activity Journal* **29**: 1–6. doi:10.1123/wspaj.2021-0028.

- Dabbech, M., Aubert, R., Apfelbaum, M., and Boulier, A. 1997. Intérêts et difficultés des mesures de dépenses énergétiques postprandiales : application à l'étude de l'obésité. *Nutrition Clinique et Métabolisme* **11**(3): 181–190. doi:10.1016/S0985-0562(97)80043-X.
- Daniusevičiūtė, L., Brazaitis, M., Skurvydas, A., Sipavičienė, S., Linonis, V., Piečaitienė, J., and Eimantas, N. 2010. Changes in Concentration of Creatine Kinase, Body Composition and Lipoprotein during Menstrual Cycle. *Baltic Journal of Sport and Health Sciences* **2**(77). doi:10.33607/bjshs.v2i77.374.
- Davis, H.C., and Hackney, A.C. 2017. The Hypothalamic–Pituitary–Ovarian Axis and Oral Contraceptives: Regulation and Function. *In Sex Hormones, Exercise and Women. Edited by A.C. Hackney.* Springer International Publishing, Cham. pp. 1–17. doi:10.1007/978-3-319-44558-8_1.
- Day, D.S., Gozansky, W.S., Van Pelt, R.E., Schwartz, R.S., and Kohrt, W.M. 2005. Sex hormone suppression reduces resting energy expenditure and {beta}-adrenergic support of resting energy expenditure. *J Clin Endocrinol Metab* **90**(6): 3312–3317. doi:10.1210/jc.2004-1344.
- De Souza, M.J., Maguire, M.S., Rubin, K.R., and Maresh, C.M. 1990. Effects of menstrual phase and amenorrhea on exercise performance in runners. *Medicine & Science in Sports & Exercise* **22**(5): 575.
- De Souza, M.J., Nattiv, A., Joy, E., Misra, M., Williams, N.I., Mallinson, R.J., Gibbs, J.C., Olmsted, M., Goolsby, M., Matheson, G., and Expert Panel. 2014. 2014 Female Athlete Triad Coalition Consensus Statement on Treatment and Return to Play of the Female Athlete Triad: 1st International Conference held in San Francisco, California, May 2012 and 2nd International Conference held in Indianapolis, Indiana, May 2013. *Br J Sports Med* **48**(4): 289. doi:10.1136/bjsports-2013-093218.
- De Souza, M.J., Toombs, R.J., Scheid, J.L., O'Donnell, E., West, S.L., and Williams, N.I. 2010. High prevalence of subtle and severe menstrual disturbances in exercising women: confirmation using daily hormone measures. *Human Reproduction* **25**(2): 491–503. doi:10.1093/humrep/dep411.
- DeBlauw, J.A., Churchill, A.I., Yunda, B.C., Kotarsky, C.J., Caldwell, A., and Ives, S.J. 2023. The effects of short-term caloric restriction on cardiometabolic health in overweight/obese men and women: A single-arm trial. *Physiological Reports* **11**(22): e15856. doi:10.14814/phy2.15856.
- Degoutte, F., Jouanel, P., Begue, R.J., Colombier, M., Lac, G., Pequignot, J.M., and Filaire, E. 2006. Food Restriction, Performance, Biochemical, Psychological, and Endocrine Changes in Judo Athletes. *International Journal of Sports Medicine* **27**(1): 9–18. ;
- D'Eon, T.M., Sharoff, C., Chipkin, S.R., Grow, D., Ruby, B.C., and Braun, B. 2002. Regulation of exercise carbohydrate metabolism by estrogen and progesterone in women. *Am J Physiol Endocrinol Metab* **283**(5): E1046-1055. doi:10.1152/ajpendo.00271.2002.
- D'Eon, T.M., Souza, S.C., Aronovitz, M., Obin, M.S., Fried, S.K., and Greenberg, A.S. 2005. Estrogen regulation of adiposity and fuel partitioning. Evidence of genomic and non-genomic regulation of lipogenic and oxidative pathways. *J Biol Chem* **280**(43): 35983–35991. doi:10.1074/jbc.M507339200.
- Devries, M.C., Hamadeh, M.J., Phillips, S.M., and Tarnopolsky, M.A. 2006. Menstrual cycle phase and sex influence muscle glycogen utilization and glucose turnover during moderate-intensity endurance exercise. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* **291**(4): R1120-1128. doi:10.1152/ajpregu.00700.2005.
- Division, U.P. 2019. Contraceptive use by method 2019 :: data booklet. UN,. Available from <https://digitallibrary.un.org/record/3849735> [accessed 14 June 2024].
- Doherty, C.S., Fortington, L.V., and Barley, O.R. 2024. Prevalence of disordered eating and its relationship with rapid weight loss amongst male and female combat sport competitors: A prospective study. *J Sci Med Sport: S1440-2440(24)00221-4*. doi:10.1016/j.jsams.2024.06.007.
- Dokumaci, B., and Hazir, T. 2019. Effects of the Menstrual Cycle on Running Economy: Oxygen Cost Versus Caloric Cost. *Res Q Exerc Sport* **90**(3): 318–326. doi:10.1080/02701367.2019.1599800.

- Dombovy, M.L., Bonekat, H.W., Williams, T.J., and Staats, B.A. 1987. Exercise performance and ventilatory response in the menstrual cycle. *Med Sci Sports Exerc* **19**(2): 111–117.
- Doucet, E., St Pierre, S., Alméras, N., Mauriège, P., Richard, D., and Tremblay, A. 2000. Changes in energy expenditure and substrate oxidation resulting from weight loss in obese men and women: is there an important contribution of leptin? *J Clin Endocrinol Metab* **85**(4): 1550–1556. doi:10.1210/jcem.85.4.6500.
- Doucet, E., St-Pierre, S., Alméras, N., Després, J.P., Bouchard, C., and Tremblay, A. 2001. Evidence for the existence of adaptive thermogenesis during weight loss. *Br J Nutr* **85**(6): 715–723. doi:10.1079/bjn2001348.
- Drapeau, V., Provencher, V., Lemieux, S., Després, J.-P., Bouchard, C., and Tremblay, A. 2003. Do 6-y changes in eating behaviors predict changes in body weight? Results from the Québec Family Study. *Int J Obes* **27**(7): 808–814. Nature Publishing Group. doi:10.1038/sj.ijo.0802303.
- Driancourt, M.A., and Levasseur, M.C. 2001. Cycles estriens et cycles menstruels. INRA Editions Ellipses. Available from <https://hal.inrae.fr/hal-02834111> [accessed 12 June 2024].
- D’Souza, A.C., Wageh, M., Williams, J.S., Colenso-Semple, L.M., McCarthy, D.G., McKay, A.K.A., Elliott-Sale, K.J., Burke, L.M., Parise, G., MacDonald, M.J., Tarnopolsky, M.A., and Phillips, S.M. 2023. Menstrual cycle hormones and oral contraceptives: a multimethod systems physiology-based review of their impact on key aspects of female physiology. *J Appl Physiol* (1985) **135**(6): 1284–1299. doi:10.1152/jappphysiol.00346.2023.
- Duclos, M. 2020. La triade de la sportive : mise au point, les nouvelles données. *La Presse Médicale Formation* **1**(5): 496–503. doi:10.1016/j.lpmfor.2020.10.013.
- Duhita, M.R., Schutz, Y., Montani, J.-P., Dulloo, A.G., and Miles-Chan, J.L. 2017. Oral Contraceptive Pill Alters Acute Dietary Protein-Induced Thermogenesis in Young Women. *Obesity (Silver Spring)* **25**(9): 1482–1485. doi:10.1002/oby.21919.
- Duhita, M.R., Schutz, Y., Montani, J.-P., Dulloo, A.G., and Miles-Chan, J.L. 2019. Assessment of the Dose-Response Relationship between Meal Protein Content and Postprandial Thermogenesis: Effect of Sex and the Oral Contraceptive Pill. *Nutrients* **11**(7): 1599. doi:10.3390/nu11071599.
- Dulloo, A.G. 2021. Physiology of weight regain: Lessons from the classic Minnesota Starvation Experiment on human body composition regulation. *Obes Rev* **22 Suppl 2**: e13189. doi:10.1111/obr.13189.
- Dulloo, A.G., and Jacquet, J. 1998. Adaptive reduction in basal metabolic rate in response to food deprivation in humans: a role for feedback signals from fat stores. *Am J Clin Nutr* **68**(3): 599–606. doi:10.1093/ajcn/68.3.599.
- Dulloo, A.G., and Jacquet, J. 2001. An adipose-specific control of thermogenesis in body weight regulation. *Int J Obes Relat Metab Disord* **25 Suppl 5**: S22–29. doi:10.1038/sj.ijo.0801907.
- Dulloo, A.G., Jacquet, J., and Girardier, L. 1996. Autoregulation of body composition during weight recovery in human: the Minnesota Experiment revisited. *Int J Obes Relat Metab Disord* **20**(5): 393–405.
- Dulloo, A.G., Jacquet, J., and Girardier, L. 1997. Poststarvation hyperphagia and body fat overshooting in humans: a role for feedback signals from lean and fat tissues. *Am J Clin Nutr* **65**(3): 717–723. doi:10.1093/ajcn/65.3.717.
- Dulloo, A.G., Jacquet, J., Montani, J.-P., and Schutz, Y. 2015. How dieting makes the lean fatter: from a perspective of body composition autoregulation through adipostats and proteinstats awaiting discovery. *Obesity reviews : an official journal of the International Association for the Study of Obesity* **16 Suppl 1**. *Obes Rev*. doi:10.1111/obr.12253.
- Dulloo, A.G., Jacquet, J., Seydoux, J., and Montani, J.-P. 2006. The thrifty “catch-up fat” phenotype: its impact on insulin sensitivity during growth trajectories to obesity and metabolic syndrome. *Int J Obes (Lond)* **30 Suppl 4**: S23–35. doi:10.1038/sj.ijo.0803516.
- Dulloo, A.G., Miles-Chan, J.L., and Schutz, Y. 2018. Collateral fattening in body composition autoregulation: its determinants and significance for obesity predisposition. *European*

- Journal of Clinical Nutrition **72**(5): 657–664. Nature Publishing Group. doi:10.1038/s41430-018-0138-6.
- Dulloo, A.G., and Schutz, Y. 2015. Adaptive Thermogenesis in Resistance to Obesity Therapies: Issues in Quantifying Thrifty Energy Expenditure Phenotypes in Humans. *Curr Obes Rep* **4**(2): 230–240. doi:10.1007/s13679-015-0156-9.
- Dulloo, A.G., Seydoux, J., and Jacquet, J. 2004. Adaptive thermogenesis and uncoupling proteins: a reappraisal of their roles in fat metabolism and energy balance. *Physiol Behav* **83**(4): 587–602. doi:10.1016/j.physbeh.2004.07.028.
- Eck, L.H., Bennett, A.G., Egan, B.M., Ray, J.W., Mitchell, C.O., Smith, M.A., and Klesges, R.C. 1997. Differences in macronutrient selections in users and nonusers of an oral contraceptive. *Am J Clin Nutr* **65**(2): 419–424. doi:10.1093/ajcn/65.2.419.
- Eckert, E., Gottesman, I., Swigart, S.E., and Casper, R. 2018. A 57-year follow-up investigation and review of the Minnesota study on human starvation and its relevance to eating disorders. *Archives of Psychology* **2**(3).
- Ekenros, L., von Rosen, P., Solli, G.S., Sandbakk, Ø., Holmberg, H.-C., Hirschberg, A.L., and Fridén, C. 2022. Perceived impact of the menstrual cycle and hormonal contraceptives on physical exercise and performance in 1,086 athletes from 57 sports. *Front Physiol* **13**: 954760. doi:10.3389/fphys.2022.954760.
- Elliott-Sale, K. 2023. Ovarian Hormones: How to Conduct High-Quality Sport and Exercise Science Research on Female Athletes. *Sports Science Exchange* **36**(235): 1–7.
- Elliott-Sale, K.J., McNulty, K.L., Ansdell, P., Goodall, S., Hicks, K.M., Thomas, K., Swinton, P.A., and Dolan, E. 2020. The Effects of Oral Contraceptives on Exercise Performance in Women: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Med* **50**(10): 1785–1812. doi:10.1007/s40279-020-01317-5.
- Elliott-Sale, K.J., Minahan, C.L., de Jonge, X.A.K.J., Ackerman, K.E., Sipilä, S., Constantini, N.W., Lebrun, C.M., and Hackney, A.C. 2021. Methodological Considerations for Studies in Sport and Exercise Science with Women as Participants: A Working Guide for Standards of Practice for Research on Women. *Sports Med* **51**(5): 843–861. doi:10.1007/s40279-021-01435-8.
- Ellis, G.S., Lanza-Jacoby, S., Gow, A., and Kendrick, Z.V. 1994. Effects of estradiol on lipoprotein lipase activity and lipid availability in exercised male rats. *J Appl Physiol* (1985) **77**(1): 209–215. doi:10.1152/jappl.1994.77.1.209.
- Endrikat, J., Blode, H., Gerlinger, C., Rosenbaum, P., and Kuhn, W. 2002. A pharmacokinetic study with a low-dose oral contraceptive containing 20 microg ethinylestradiol plus 100 microg levonorgestrel. *Eur J Contracept Reprod Health Care* **7**(2): 79–90.
- Engseth, T.P., Andersson, E.P., Solli, G.S., Morseth, B., Thomassen, T.O., Noordhof, D.A., Sandbakk, Ø., and Welde, B. 2022. Prevalence and Self-Perceived Experiences With the Use of Hormonal Contraceptives Among Competitive Female Cross-Country Skiers and Biathletes in Norway: The FENDURA Project. *Front. Sports Act. Living* **4**. Frontiers. doi:10.3389/fspor.2022.873222.
- Ennequin, G., Thivel, D., Mourot, L., and Isacco, L. 2023. Physically active men present a healthier cardiometabolic profile in response to a balanced meal compared to inactive men. *Eur J Appl Physiol* **123**(2): 283–297. doi:10.1007/s00421-022-05067-2.
- Evers, C., Dingemans, A., Junghans, A.F., and Boevé, A. 2018. Feeling bad or feeling good, does emotion affect your consumption of food? A meta-analysis of the experimental evidence. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* **92**: 195–208. doi:10.1016/j.neubiorev.2018.05.028.
- Finlayson, G., King, N., and Blundell, J.E. 2007. Liking vs. wanting food: importance for human appetite control and weight regulation. *Neurosci Biobehav Rev* **31**(7): 987–1002. doi:10.1016/j.neubiorev.2007.03.004.
- Flier, J.S., Harris, M., and Hollenberg, A.N. 2000. Leptin, nutrition, and the thyroid: the why, the wherefore, and the wiring. *J Clin Invest* **105**(7): 859–861.

- Fogelholm, G.M., Koskinen, R., Laakso, J., Rankinen, T., and Ruokonen, I. 1993. Gradual and rapid weight loss: effects on nutrition and performance in male athletes. *Med Sci Sports Exerc* **25**(3): 371–377.
- Fogelholm, M. 1994. Effects of bodyweight reduction on sports performance. *Sports Med* **18**(4): 249–267. doi:10.2165/00007256-199418040-00004.
- Fontana, L., Meyer, T.E., Klein, S., and Holloszy, J.O. 2004. Long-term calorie restriction is highly effective in reducing the risk for atherosclerosis in humans. *Proc Natl Acad Sci U S A* **101**(17): 6659–6663. doi:10.1073/pnas.0308291101.
- Forbes, G.B. 1987. Lean body mass-body fat interrelationships in humans. *Nutr Rev* **45**(8): 225–231. doi:10.1111/j.1753-4887.1987.tb02684.x.
- Freemas, J.A., Baranauskas, M.N., Constantini, K., Constantini, N., Greenshields, J.T., Mickleborough, T.D., Raglin, J.S., and Schlader, Z.J. 2021. Exercise Performance Is Impaired during the Midluteal Phase of the Menstrual Cycle. *Med Sci Sports Exerc* **53**(2): 442–452. doi:10.1249/MSS.0000000000002464.
- Friedl, K.E., Moore, R.J., Martinez-Lopez, L.E., Vogel, J.A., Askew, E.W., Marchitelli, L.J., Hoyt, R.W., and Gordon, C.C. 1994. Lower limit of body fat in healthy active men. *Journal of Applied Physiology* **77**(2): 933–940. American Physiological Society. doi:10.1152/jappl.1994.77.2.933.
- Frühbeck, G., Méndez-Giménez, L., Fernández-Formoso, J.-A., Fernández, S., and Rodríguez, A. 2014. Regulation of adipocyte lipolysis. *Nutrition Research Reviews* **27**(1): 63–93. doi:10.1017/S095442241400002X.
- Fullmer, S., Benson-Davies, S., Earthman, C.P., Frankenfield, D.C., Gradwell, E., Lee, P.S.P., Piemonte, T., and Trabulsi, J. 2015. Evidence analysis library review of best practices for performing indirect calorimetry in healthy and non-critically ill individuals. *J Acad Nutr Diet* **115**(9): 1417–1446.e2. doi:10.1016/j.jand.2015.04.003.
- Gallo, M.F., Lopez, L.M., Grimes, D.A., Carayon, F., Schulz, K.F., and Helmerhorst, F.M. 2014. Combination contraceptives: effects on weight. *Cochrane Database of Systematic Reviews* (1). John Wiley & Sons, Ltd. doi:10.1002/14651858.CD003987.pub5.
- Gardner, D.F., Kaplan, M.M., Stanley, C.A., and Utiger, R.D. 1979. Effect of tri-iodothyronine replacement on the metabolic and pituitary responses to starvation. *N Engl J Med* **300**(11): 579–584. doi:10.1056/NEJM197903153001102.
- Gavin, K.M., Kohrt, W.M., Klemm, D.J., and Melanson, E.L. 2018. Modulation of Energy Expenditure by Estrogens and Exercise in Women. *Exerc Sport Sci Rev* **46**(4): 232–239. doi:10.1249/JES.000000000000160.
- Gibney, M.J., Barr, S.I., Bellisle, F., Drewnowski, A., Fagt, S., Hopkins, S., Livingstone, B., Varela-Moreiras, G., Moreno, L., Smith, J., Vieux, F., Thielecke, F., and Masset, G. 2018. Towards an Evidence-Based Recommendation for a Balanced Breakfast—A Proposal from the International Breakfast Research Initiative. *Nutrients* **10**(10): 1540. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. doi:10.3390/nu10101540.
- Giersch, G.E.W., Charkoudian, N., Stearns, R.L., and Casa, D.J. 2020. Fluid Balance and Hydration Considerations for Women: Review and Future Directions. *Sports Med* **50**(2): 253–261. doi:10.1007/s40279-019-01206-6.
- Gimunová, M., Paulínyová, A., Bernaciková, M., and Paludo, A.C. 2022. The Prevalence of Menstrual Cycle Disorders in Female Athletes from Different Sports Disciplines: A Rapid Review. *Int J Environ Res Public Health* **19**(21): 14243. doi:10.3390/ijerph192114243.
- Greendale, G.A., Lee, N.P., and Arriola, E.R. 1999. The menopause. *The Lancet* **353**(9152): 571–580. Elsevier. doi:10.1016/S0140-6736(98)05352-5.
- Greenway, F.L. 2015. Physiological adaptations to weight loss and factors favouring weight regain. *Int J Obes (Lond)* **39**(8): 1188–1196. doi:10.1038/ijo.2015.59.
- Griffioen-Roose, S., Hogenkamp, P.S., Mars, M., Finlayson, G., and de Graaf, C. 2012. Taste of a 24-h diet and its effect on subsequent food preferences and satiety. *Appetite* **59**(1): 1–8. doi:10.1016/j.appet.2012.03.013.

- Hachul, H., Hachul de Campos, B., Lucena, L., and Tufik, S. 2023. Sleep During Menopause. *Sleep Med Clin* **18**(4): 423–433. doi:10.1016/j.jsmc.2023.06.004.
- Hackney, A.C. 1990. Effects of the menstrual cycle on resting muscle glycogen content. *Horm Metab Res* **22**(12): 647. doi:10.1055/s-2007-1004994.
- Hackney, A.C. 1999. Influence of oestrogen on muscle glycogen utilization during exercise. *Acta Physiol Scand* **167**(3): 273–274. doi:10.1046/j.1365-201x.1999.00605.x.
- Hackney, A.C. 2021. Menstrual Cycle Hormonal Changes and Energy Substrate Metabolism in Exercising Women: A Perspective. *Int J Environ Res Public Health* **18**(19): 10024. doi:10.3390/ijerph181910024.
- Hackney, A.C., Curley, C.S., and Nicklas, B.J. 1991. Physiological responses to submaximal exercise at the mid-follicular, ovulatory and mid-luteal phases of the menstrual cycle. *Scand J Med Sci Sports* **1**(2): 94–98. doi:10.1111/j.1600-0838.1991.tb00277.x.
- Hackney, A.C., McCracken-Compton, M.A., and Ainsworth, B. 1994. Substrate responses to submaximal exercise in the midfollicular and midluteal phases of the menstrual cycle. *Int J Sport Nutr* **4**(3): 299–308. doi:10.1123/ijns.4.3.299.
- Halliday, T.M., Davy, B.M., Clark, A.G., Baugh, M.E., Hedrick, V.E., Marinik, E.L., Flack, K.D., Savla, J., Winett, S., and Winett, R.A. 2014. Dietary intake modification in response to a participation in a resistance training program for sedentary older adults with prediabetes: Findings from the Resist Diabetes study. *Eating Behav.* **15**(3): 379–382. doi:10.1016/j.eatbeh.2014.04.004.
- Hantsoo, L., Rangaswamy, S., Voegtline, K., Salimgaraev, R., Zhaunova, L., and Payne, J.L. 2022. Premenstrual symptoms across the lifespan in an international sample: data from a mobile application. *Arch Womens Ment Health* **25**(5): 903–910. doi:10.1007/s00737-022-01261-5.
- Hatta, H., Atomi, Y., Shinohara, S., Yamamoto, Y., and Yamada, S. 1988. The effects of ovarian hormones on glucose and fatty acid oxidation during exercise in female ovariectomized rats. *Horm Metab Res* **20**(10): 609–611. doi:10.1055/s-2007-1010897.
- Heatherton, T.F., and Wagner, D.D. 2011. Cognitive neuroscience of self-regulation failure. *Trends Cogn Sci* **15**(3): 132–139. doi:10.1016/j.tics.2010.12.005.
- Hebebrand, J., and Hinney, A. 2009. Environmental and genetic risk factors in obesity. *Child Adolesc Psychiatr Clin N Am* **18**(1): 83–94. doi:10.1016/j.chc.2008.07.006.
- Henry, C.J., Rivers, J.P., and Payne, P.R. 1988. Protein and energy metabolism in starvation reconsidered. *Eur J Clin Nutr* **42**(7): 543–549.
- Herman, C.P., and Mack, D. 1975. Restrained and unrestrained eating. *J Pers* **43**(4): 647–660. doi:10.1111/j.1467-6494.1975.tb00727.x.
- Heydenreich, J., Kayser, B., Schutz, Y., and Melzer, K. 2017. Total Energy Expenditure, Energy Intake, and Body Composition in Endurance Athletes Across the Training Season: A Systematic Review. *Sports Med Open* **3**(1): 8. doi:10.1186/s40798-017-0076-1.
- Heyman, M.B., Young, V.R., Fuss, P., Tsay, R., Joseph, L., and Roberts, S.B. 1992. Underfeeding and body weight regulation in normal-weight young men. *Am J Physiol* **263**(2 Pt 2): R250-257. doi:10.1152/ajpregu.1992.263.2.R250.
- Heymsfield, S.B., Brown, J., Ramirez, S., Prado, C.M., Tinsley, G.M., and Gonzalez, M.C. 2024. Are Lean Body Mass and Fat-Free Mass the Same or Different Body Components? A Critical Perspective. *Advances in Nutrition* **15**(12): 100335. doi:10.1016/j.advnut.2024.100335.
- Heymsfield, S.B., Thomas, D., Nguyen, A.M., Peng, J.Z., Martin, C., Shen, W., Strauss, B., Bosy-Westphal, A., and Muller, M.J. 2011. Voluntary weight loss: systematic review of early phase body composition changes. *Obes Rev* **12**(5): e348-361. doi:10.1111/j.1467-789X.2010.00767.x.
- Hirschberg, A.L. 2022. Challenging Aspects of Research on the Influence of the Menstrual Cycle and Oral Contraceptives on Physical Performance. *Sports Med* **52**(7): 1453–1456. doi:10.1007/s40279-021-01616-5.
- Hong, M., Yan, Q., Tao, B., Boersma, A., Han, K.-K., Vantuyghem, M.-C., Racadot, A., and Lefebvre, J. 1992. Estradiol, Progesterone and Testosterone Exposures Affect the Atrial Natriuretic

- Peptide Gene Expression in vivo in Rats. **373**(1): 213–218. De Gruyter. doi:10.1515/bchm3.1992.373.1.213.
- Hopkins, M., Gibbons, C., and Blundell, J. 2023. Fat-free mass and resting metabolic rate are determinants of energy intake: implications for a theory of appetite control. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **378**(1885): 20220213. Royal Society. doi:10.1098/rstb.2022.0213.
- Hopkins, M., Gibbons, C., Caudwell, P., Hellström, P.M., Näslund, E., King, N.A., Finlayson, G., and Blundell, J.E. 2014. The adaptive metabolic response to exercise-induced weight loss influences both energy expenditure and energy intake. *Eur J Clin Nutr* **68**(5): 581–586. doi:10.1038/ejcn.2013.277.
- Horner, K.M., Finlayson, G., Byrne, N.M., and King, N.A. 2016. Food reward in active compared to inactive men: Roles for gastric emptying and body fat. *Physiol Behav* **160**: 43–49. doi:10.1016/j.physbeh.2016.04.009.
- Horswill, C.A. 1993. Weight loss and weight cycling in amateur wrestlers: implications for performance and resting metabolic rate. *International Journal of Sport Nutrition* **3**(3): 245–260. ;
- Horton, T.J., Miller, E.K., Glueck, D., and Tench, K. 2002. No effect of menstrual cycle phase on glucose kinetics and fuel oxidation during moderate-intensity exercise. *Am J Physiol Endocrinol Metab* **282**(4): E752-762. doi:10.1152/ajpendo.00238.2001.
- Hosokawa, M., Imazeki, S., Mizunuma, H., Kubota, T., and Hayashi, K. 2012. Secular trends in age at menarche and time to establish regular menstrual cycling in Japanese women born between 1930 and 1985. *BMC Women's Health* **12**(1): 19. doi:10.1186/1472-6874-12-19.
- Hoyt, L.T., and Falconi, A.M. 2015. Puberty and perimenopause: reproductive transitions and their implications for women's health. *Soc Sci Med* **132**: 103–112. doi:10.1016/j.socscimed.2015.03.031.
- Huebner, M., and Perperoglou, A. 2020. Sex differences and impact of body mass on performance from childhood to senior athletes in Olympic weightlifting. *PLOS ONE* **15**(9): e0238369. Public Library of Science. doi:10.1371/journal.pone.0238369.
- Hulmi, J.J., Isola, V., Suonpää, M., Järvinen, N.J., Kokkonen, M., Wennerström, A., Nyman, K., Perola, M., Ahtiainen, J.P., and Häkkinen, K. 2017. The effects of intensive weight reduction on body composition and serum hormones in female fitness competitors. *Front. Physiol.* **7**(JAN). doi:10.3389/fphys.2016.00689.
- Hwa, J.J., Fawzi, A.B., Graziano, M.P., Ghibaudi, L., Williams, P., Van Heek, M., Davis, H., Rudinski, M., Sybertz, E., and Strader, C.D. 1997. Leptin increases energy expenditure and selectively promotes fat metabolism in ob/ob mice. *Am J Physiol* **272**(4 Pt 2): R1204-1209. doi:10.1152/ajpregu.1997.272.4.R1204.
- Iceta, S., Disse, E., and Poulet, E. 2019, January 14. Rethinking food disinhibition in obesity from the perspective of the food addiction hypothesis.
- Ihalainen, J.K., Löfberg, I., Kotkajuuri, A., Kyröläinen, H., Hackney, A.C., and Taipale-Mikkonen, R.S. 2021. Influence of Menstrual Cycle or Hormonal Contraceptive Phase on Energy Intake and Metabolic Hormones-A Pilot Study. *Endocrines* **2**(2): 79–90. doi:10.3390/endocrines2020008.
- Isacco, L., and Boisseau, N. 2023. Sex Hormones and Substrate Metabolism During Endurance Exercise. *In Sex Hormones, Exercise and Women: Scientific and Clinical Aspects. Edited by A.C. Hackney.* Springer International Publishing, Cham. pp. 25–54. doi:10.1007/978-3-031-21881-1_2.
- Isacco, L., Degoutte, F., Ennequin, G., Pereira, B., Thivel, D., and Filaire, E. 2020. Rapid weight loss influences the physical, psychological and biological responses during a simulated competition in national judo athletes. *European Journal of Sport Science* **20**(5): 580–591.
- Isacco, L., Duché, P., and Boisseau, N. 2012a. Influence of Hormonal Status on Substrate Utilization at Rest and during Exercise in the Female Population. *Sports Med* **42**(4): 327–342. doi:10.2165/11598900-000000000-00000.

- Isacco, L., Ennequin, G., and Boisseau, N. 2023. Influence of the different hormonal status changes during their life on fat mass localisation in women: a narrative review. *Archives of Physiology and Biochemistry* **129**(6): 1229–1234. Taylor & Francis. doi:10.1080/13813455.2021.1933045.
- Isacco, L., Thivel, D., Meddahi-Pelle, A., Lemoine-Morel, S., Duclos, M., and Boisseau, N. 2014. Exercise per se masks oral contraceptive-induced postprandial lipid mobilization. *Appl Physiol Nutr Metab* **39**(11): 1222–1229. doi:10.1139/apnm-2014-0053.
- Isacco, L., Thivel, D., Pelle, A.M., Zouhal, H., Duclos, M., Duche, P., and Boisseau, N. 2012b. Oral contraception and energy intake in women: impact on substrate oxidation during exercise. *Appl Physiol Nutr Metab* **37**(4): 646–656. doi:10.1139/h2012-031.
- Isacco, L., Thivel, D., Pereira, B., Duclos, M., and Boisseau, N. 2015. Maximal fat oxidation, but not aerobic capacity, is affected by oral contraceptive use in young healthy women. *Eur J Appl Physiol* **115**(5): 937–945. doi:10.1007/s00421-014-3075-7.
- Isola, V., Hulmi, J.J., Petäjä, P., Helms, E.R., Karppinen, J.E., and Ahtiainen, J.P. 2023. Weight loss induces changes in adaptive thermogenesis in female and male physique athletes. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* **48**(4): 307–320. NRC Research Press. doi:10.1139/apnm-2022-0372.
- Jacobs, K.A., Casazza, G.A., Suh, S.-H., Horning, M.A., and Brooks, G.A. 2005. Fatty acid reesterification but not oxidation is increased by oral contraceptive use in women. *J Appl Physiol* (1985) **98**(5): 1720–1731. doi:10.1152/jappphysiol.00685.2004.
- Jacquet, P., Schutz, Y., Montani, J.-P., and Dulloo, A. 2020. How dieting might make some fatter: modeling weight cycling toward obesity from a perspective of body composition autoregulation. *Int J Obes* **44**(6): 1243–1253. Nature Publishing Group. doi:10.1038/s41366-020-0547-1.
- Janse DE Jonge, X., Thompson, B., and Han, A. 2019. Methodological Recommendations for Menstrual Cycle Research in Sports and Exercise. *Med Sci Sports Exerc* **51**(12): 2610–2617. doi:10.1249/MSS.0000000000002073.
- Jennings, A.E., Alberga, A., Sigal, R.J., Jay, O., Boulé, N.G., and Kenny, G.P. 2009. The effect of exercise training on resting metabolic rate in type 2 diabetes mellitus. *Med Sci Sports Exerc* **41**(8): 1558–1565. doi:10.1249/MSS.0b013e31819d6a6f.
- Jensen, M.D., and Levine, J. 1998. Effects of oral contraceptives on free fatty acid metabolism in women. *Metabolism* **47**(3): 280–284. doi:10.1016/s0026-0495(98)90257-8.
- Jeong, H.G., and Park, H. 2022. Metabolic Disorders in Menopause. *Metabolites* **12**(10): 954. doi:10.3390/metabo12100954.
- Jetton, A.M., Lawrence, M.M., Meucci, M., Haines, T.L., Collier, S.R., Morris, D.M., and Utter, A.C. 2013. Dehydration and acute weight gain in mixed martial arts fighters before competition. *J Strength Cond Res* **27**(5): 1322–1326. doi:10.1519/JSC.0b013e31828a1e91.
- Jeukendrup, A., and Gleeson, M. 2010. Normal ranges of body weight and body fat. *Human Kinetics Sport Nutrition, Second Edition*: 488.
- Johnson, F., Pratt, M., and Wardle, J. 2012. Dietary restraint and self-regulation in eating behavior. *Int J Obes* **36**(5): 665–674. Nature Publishing Group. doi:10.1038/ijo.2011.156.
- Kajioka, T., Tsuzuku, S., Shimokata, H., and Sato, Y. 2002. Effects of intentional weight cycling on non-obese young women. *Metabolism* **51**(2): 149–154. doi:10.1053/meta.2002.29976.
- Kalm, L.M., and Semba, R.D. 2005. They Starved So That Others Be Better Fed: Remembering Ancel Keys and the Minnesota Experiment. *The Journal of Nutrition* **135**(6): 1347–1352. doi:10.1093/jn/135.6.1347.
- Kärkkäinen, U., Mustelin, L., Raevuori, A., Kaprio, J., and Keski-Rahkonen, A. 2018. Successful weight maintainers among young adults—A ten-year prospective population study. *Eat Behav* **29**: 91–98. doi:10.1016/j.eatbeh.2018.03.004.
- Karstoft, K., Brinkløv, C.F., Thorsen, I.K., Nielsen, J.S., and Ried-Larsen, M. 2017. Resting Metabolic Rate Does Not Change in Response to Different Types of Training in Subjects with Type 2 Diabetes. *Front Endocrinol (Lausanne)* **8**: 132. doi:10.3389/fendo.2017.00132.

- Kelley, D.E. 2005. Skeletal muscle fat oxidation: timing and flexibility are everything. *J Clin Invest* **115**(7): 1699–1702. doi:10.1172/JCI25758.
- Kendrick, Z.V., Steffen, C.A., Rumsey, W.L., and Goldberg, D.I. 1987. Effect of estradiol on tissue glycogen metabolism in exercised oophorectomized rats. *J Appl Physiol* (1985) **63**(2): 492–496. doi:10.1152/jappl.1987.63.2.492.
- Keys, A., Brozek, J., Henschel, A., Mickelsen, O., and Taylor, H. 1950. *The Biology of Human Starvation. In Vols I-II.* University of Minnesota Press, Minneapolis, MN.
- Khodaei, M., Olewinski, L., Shadgan, B., and Kiningham, R.R. 2015. Rapid Weight Loss in Sports with Weight Classes. *Current Sports Medicine Reports* (Lippincott Williams & Wilkins) **14**(6): 435–441.
- King, J.A., Wasse, L.K., Ewens, J., Crystallis, K., Emmanuel, J., Batterham, R.L., and Stensel, D.J. 2011. Differential acylated ghrelin, peptide YY3-36, appetite, and food intake responses to equivalent energy deficits created by exercise and food restriction. *J Clin Endocrinol Metab* **96**(4): 1114–1121. doi:10.1210/jc.2010-2735.
- King, N.A., Caudwell, P.P., Hopkins, M., Stubbs, J.R., Naslund, E., and Blundell, J.E. 2009. Dual-process action of exercise on appetite control: increase in orexigenic drive but improvement in meal-induced satiety. *The American Journal of Clinical Nutrition* **90**(4): 921–927. doi:10.3945/ajcn.2009.27706.
- Kissow, J., Jacobsen, K.J., Gunnarsson, T.P., Jessen, S., and Hostrup, M. 2022. Effects of Follicular and Luteal Phase-Based Menstrual Cycle Resistance Training on Muscle Strength and Mass. *Sports Med* **52**(12): 2813–2819. doi:10.1007/s40279-022-01679-y.
- Kitajima, Y., and Ono, Y. 2016. Estrogens maintain skeletal muscle and satellite cell functions. *J Endocrinol* **229**(3): 267–275. doi:10.1530/JOE-15-0476.
- Klein, N.A., and Soules, M.R. 1998. Endocrine changes of the perimenopause. *Clin Obstet Gynecol* **41**(4): 912–920. doi:10.1097/00003081-199812000-00017.
- Klump, K.L., and Di Dio, A.M. 2022. Combined oral contraceptive use and risk for binge eating in women: Potential gene × hormone interactions. *Frontiers in Neuroendocrinology* **67**: 101039. doi:10.1016/j.yfrne.2022.101039.
- Koehler, K., De Souza, M.J., and Williams, N.I. 2017. Less-than-expected weight loss in normal-weight women undergoing caloric restriction and exercise is accompanied by preservation of fat-free mass and metabolic adaptations. *Eur J Clin Nutr* **71**(3): 365–371. doi:10.1038/ejcn.2016.203.
- Kondo, E., Shiose, K., Osawa, T., Motonaga, K., Kamei, A., Nakajima, K., Sagayama, H., Wada, T., Nishiguchi, S., and Takahashi, H. 2021. Effects of an overnight high-carbohydrate meal on muscle glycogen after rapid weight loss in male collegiate wrestlers. *BMC Sports Science, Medicine & Rehabilitation* **13**(1): 1–8.
- Kondo, E., Shiose, K., Yamada, Y., Osawa, T., Sagayama, H., Motonaga, K., Ouchi, S., Kamei, A., Nakajima, K., Takahashi, H., and Okamura, K. 2019. Effect of Thoracic Gas Volume Changes on Body Composition Assessed by Air Displacement Plethysmography after Rapid Weight Loss and Regain in Elite Collegiate Wrestlers. *Sports (Basel)* **7**(2): 48. doi:10.3390/sports7020048.
- Korkeila, M., Rissanen, A., Kaprio, J., Sorensen, T.I., and Koskenvuo, M. 1999. Weight-loss attempts and risk of major weight gain: a prospective study in Finnish adults. *Am J Clin Nutr* **70**(6): 965–975. doi:10.1093/ajcn/70.6.965.
- Koşar, Ş.N., Güzel, Y., Köse, M.G., Kin İşler, A., and Hazır, T. 2022. Whole and segmental body composition changes during mid-follicular and mid-luteal phases of the menstrual cycle in recreationally active young women. *Annals of Human Biology* **49**(2): 124–132. Taylor & Francis Ltd. doi:10.1080/03014460.2022.2088857.
- Kuikman, M.A., McKay, A.K.A., Minahan, C., Harris, R., Elliott-Sale, K.J., Stellingwerff, T., Smith, E.S., McCormick, R., Tee, N., Skinner, J., Ackerman, K.E., and Burke, L.M. 2024. Effect of Menstrual Cycle Phase and Hormonal Contraceptives on Resting Metabolic Rate and Body Composition. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* **34**(4): 207–217. doi:10.1123/ijsnem.2023-0193.

- Lakicevic, N., Matthews, J.J., Artioli, G.G., Paoli, A., Roklicer, R., Trivic, T., Bianco, A., and Drid, P. 2022. Patterns of weight cycling in youth Olympic combat sports: a systematic review. *Journal of Eating Disorders* **10**(1): 75. doi:10.1186/s40337-022-00595-w.
- Lakicevic, N., Thomas, E., Isacco, L., Tcymbal, A., Pettersson, S., Roklicer, R., Tubic, T., Paoli, A., Bianco, A., and Drid, P. 2024. Rapid weight loss and mood states in judo athletes: A systematic review. *European Review of Applied Psychology* **74**(4): 100933. doi:10.1016/j.erap.2023.100933.
- Landsberg, L. 2012. Core temperature: a forgotten variable in energy expenditure and obesity? *Obes Rev* **13 Suppl 2**: 97–104. doi:10.1111/j.1467-789X.2012.01040.x.
- Langan-Evans, C., Germaine, M., Artukovic, M., Oxborough, D.L., Areta, J.L., Close, G.L., and Morton, J.P. 2021. The Psychological and Physiological Consequences of Low Energy Availability in a Male Combat Sport Athlete. *Medicine & Science in Sports & Exercise* **53**(4): 673. doi:10.1249/MSS.0000000000002519.
- Lebron, M.A., Stout, J.R., and Fukuda, D.H. 2024. Physiological Perturbations in Combat Sports: Weight Cycling and Metabolic Function—A Narrative Review. *Metabolites* **14**(2): 83. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. doi:10.3390/metabo14020083.
- Lecoultre, V., Ravussin, E., and Redman, L.M. 2011. The Fall in Leptin Concentration Is a Major Determinant of the Metabolic Adaptation Induced by Caloric Restriction Independently of the Changes in Leptin Circadian Rhythms. *J Clin Endocrinol Metab* **96**(9): E1512–E1516. doi:10.1210/jc.2011-1286.
- Lee, M.-G., Sedlock, D.A., Flynn, M.G., and Kamimori, G.H. 2009. Resting metabolic rate after endurance exercise training. *Med Sci Sports Exerc* **41**(7): 1444–1451. doi:10.1249/MSS.0b013e31819bd617.
- Leung, K.-C., Johannsson, G., Leong, G.M., and Ho, K.K.Y. 2004. Estrogen regulation of growth hormone action. *Endocr Rev* **25**(5): 693–721. doi:10.1210/er.2003-0035.
- Lindh, I., Skjeldestad, F.E., Gemzell-Danielsson, K., Heikinheimo, O., Hognert, H., Milsom, I., and Lidegaard, Ø. 2017. Contraceptive use in the Nordic countries. *Acta Obstet Gynecol Scand* **96**(1): 19–28. doi:10.1111/aogs.13055.
- Lingor, R.J., and Olson, A. 2010. Fluid and diet patterns associated with weight cycling and changes in body composition assessed by continuous monitoring throughout a college wrestling season. *J Strength Cond Res* **24**(7): 1763–1772. doi:10.1519/JSC.0b013e3181db22fb.
- Lluch, A., Kahn, J.P., Stricker-Krongrad, A., Ziegler, O., Drouin, P., and Méjean, L. 1996. Internal validation of a French version of the Dutch eating behaviour questionnaire. *European Psychiatry* **11**(4): 198–203. Cambridge University Press. doi:10.1016/0924-9338(96)88391-X.
- Löfberg, I.E., Karppinen, J.E., Laatikainen-Raussi, V., Lehti, M., Hackney, A.C., Ihalainen, J.K., and Mikkonen, R.S. 2024. Resting Energy Expenditure, Metabolic and Sex Hormones in Two Phases of the Menstrual and Hormonal Contraceptive Cycles. *Med Sci Sports Exerc*. doi:10.1249/MSS.00000000000003518.
- Lopez, L.M., Ramesh, S., Chen, M., Edelman, A., Otterness, C., Trussell, J., and Helmerhorst, F.M. 2016. Progestin-only contraceptives: effects on weight. *Cochrane Database of Systematic Reviews* (8). John Wiley & Sons, Ltd. doi:10.1002/14651858.CD008815.pub4.
- Loucks, A.B., and Thuma, J.R. 2003. Luteinizing hormone pulsatility is disrupted at a threshold of energy availability in regularly menstruating women. *J Clin Endocrinol Metab* **88**(1): 297–311. doi:10.1210/jc.2002-020369.
- Lowe, M.R., Annunziato, R.A., Markowitz, J.T., Didie, E., Bellace, D.L., Riddell, L., Maille, C., McKinney, S., and Stice, E. 2006. Multiple types of dieting prospectively predict weight gain during the freshman year of college. *Appetite* **47**(1): 83–90. doi:10.1016/j.appet.2006.03.160.
- Lowe, M.R., and Levine, A.S. 2005. Eating motives and the controversy over dieting: eating less than needed versus less than wanted. *Obes Res* **13**(5): 797–806. doi:10.1038/oby.2005.90.
- Ma, S., and Song, S.J. 2023. Oral contraceptives containing drospirenone for premenstrual syndrome. *Cochrane Database Syst Rev* **6**(6): CD006586. doi:10.1002/14651858.CD006586.pub5.

- Macht, M. 2008. How emotions affect eating: A five-way model. *Appetite* **50**(1): 1–11. doi:10.1016/j.appet.2007.07.002.
- Maher, A.C., Akhtar, M., Vockley, J., and Tarnopolsky, M.A. 2010. Women have higher protein content of beta-oxidation enzymes in skeletal muscle than men. *PLoS One* **5**(8): e12025. doi:10.1371/journal.pone.0012025.
- Major, G.C., Doucet, E., Trayhurn, P., Astrup, A., and Tremblay, A. 2007. Clinical significance of adaptive thermogenesis. *Int J Obes (Lond)* **31**(2): 204–212. doi:10.1038/sj.ijo.0803523.
- Malo-Vintimilla, L., Aguirre, C., Vergara, A., Fernández-Verdejo, R., and Galgani, J.E. 2024. Resting energy metabolism and sweet taste preference during the menstrual cycle in healthy women. *Br J Nutr* **131**(3): 384–390. doi:10.1017/S0007114523001927.
- Manore, M.M., Berry, T.E., Skinner, J.S., and Carroll, S.S. 1991. Energy expenditure at rest and during exercise in nonobese female cyclical dieters and in nondieting control subjects. *Am J Clin Nutr* **54**(1): 41–46. doi:10.1093/ajcn/54.1.41.
- Marlatt, K.L., Pitynski-Miller, D.R., Gavin, K.M., Moreau, K.L., Melanson, E.L., Santoro, N., and Kohrt, W.M. 2022. Body composition and cardiometabolic health across the menopause transition. *Obesity (Silver Spring)* **30**(1): 14–27. doi:10.1002/oby.23289.
- Marquet, L., Brown, M., Tafflet, M., Nassif, H., Mouraby, R., Bourhaleb, S., Toussaint, J.-F., and Desgorces, F.-D. 2013. No effect of weight cycling on the post-career BMI of weight class elite athletes. *BMC Public Health* **13**: 510. doi:10.1186/1471-2458-13-510.
- Martin, C.K., Heilbronn, L.K., de Jonge, L., DeLany, J.P., Volaufova, J., Anton, S.D., Redman, L.M., Smith, S.R., and Ravussin, E. 2007. Effect of calorie restriction on resting metabolic rate and spontaneous physical activity. *Obesity (Silver Spring)* **15**(12): 2964–2973. doi:10.1038/oby.2007.354.
- Martin, D., Sale, C., Cooper, S.B., and Elliott-Sale, K.J. 2018. Period Prevalence and Perceived Side Effects of Hormonal Contraceptive Use and the Menstrual Cycle in Elite Athletes. *Int J Sports Physiol Perform* **13**(7): 926–932. doi:10.1123/ijsp.2017-0330.
- Martínez-Rosales, E., Hernández-Martínez, A., Sola-Rodríguez, S., Esteban-Cornejo, I., and Soriano-Maldonado, A. 2021. Representation of women in sport sciences research, publications, and editorial leadership positions: are we moving forward? *Journal of Science and Medicine in Sport* **24**(11): 1093–1097. doi:10.1016/j.jsams.2021.04.010.
- Masic, U., and Yeomans, M.R. 2017. Does acute or habitual protein deprivation influence liking for monosodium glutamate? *Physiol Behav* **171**: 79–86. doi:10.1016/j.physbeh.2017.01.007.
- Mathy, A., Wessner, B., Haider, P., Tschan, H., and Triska, C. 2024. The oral contraceptive cycle and its influences on maximal and submaximal endurance parameters in elite handball players. *Front Physiol* **15**: 1305895. doi:10.3389/fphys.2024.1305895.
- Matsuda-Nakamura, M., Yasuhara, S., and Nagashima, K. 2015. Effect of menstrual cycle on thermal perception and autonomic thermoregulatory responses during mild cold exposure. *J Physiol Sci* **65**(4): 339–347. BioMed Central. doi:10.1007/s12576-015-0371-x.
- Matthews, J.J., Stanhope, E.N., Godwin, M.S., Holmes, M.E.J., and Artioli, G.G. 2019. The Magnitude of Rapid Weight Loss and Rapid Weight Gain in Combat Sport Athletes Preparing for Competition: A Systematic Review. *International Journal of Sport Nutrition & Exercise Metabolism* **29**(4): 441–452.
- Mattu, A.T., Iannetta, D., MacInnis, M.J., Doyle-Baker, P.K., and Murias, J.M. 2020. Menstrual and oral contraceptive cycle phases do not affect submaximal and maximal exercise responses. *Scand J Med Sci Sports* **30**(3): 472–484. doi:10.1111/sms.13590.
- McCargar, L.J., and Crawford, S.M. 1992. Metabolic and anthropometric changes with weight cycling in wrestlers. / Modifications metaboliques et anthropométriques du fait des sequences de musculation chez les lutteurs. *Medicine & Science in Sports & Exercise* **24**(11): 1270–1275. ;
- McClung, J.M., Davis, J.M., Wilson, M.A., Goldsmith, E.C., and Carson, J.A. 2006. Estrogen status and skeletal muscle recovery from disuse atrophy. *J Appl Physiol (1985)* **100**(6): 2012–2023. doi:10.1152/jappphysiol.01583.2005.

- McHaffie, S.J., Langan-Evans, C., Morehen, J.C., Strauss, J.A., Areta, J.L., Rosimus, C., Evans, M., Elliott-Sale, K.J., Cronin, C.J., and Morton, J.P. 2022. Normalising the conversation: a qualitative analysis of player and stakeholder perceptions of menstrual health support within elite female soccer. *Sci Med Footb* **6**(5): 633–642. doi:10.1080/24733938.2022.2145349.
- Mckay, A.K.A., Minahan, C., Harris, R., McCormick, R., Skinner, J., Ackerman, K.E., and Burke, L.M. 2024. Female Athlete Research Camp: A Unique Model for Conducting Research in High-Performance Female Athletes. *Medicine & Science in Sports & Exercise* **56**(4): 706. doi:10.1249/MSS.0000000000003354.
- McMurray, R.G., Proctor, C.R., and Wilson, W.L. 1991. Effect of caloric deficit and dietary manipulation on aerobic and anaerobic exercise. *Int J Sports Med* **12**(2): 167–172. doi:10.1055/s-2007-1024662.
- McNulty, K.L., Elliott-Sale, K.J., Dolan, E., Swinton, P.A., Ansdell, P., Goodall, S., Thomas, K., and Hicks, K.M. 2020. The Effects of Menstrual Cycle Phase on Exercise Performance in Eumenorrhoeic Women: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med* **50**(10): 1813–1827. doi:10.1007/s40279-020-01319-3.
- McVay, M.A., Voils, C.I., Geiselman, P.J., Smith, V.A., Coffman, C.J., Mayer, S., and Yancy, W.S. 2016. Food preferences and weight change during low-fat and low-carbohydrate diets. *Appetite* **103**: 336–343. doi:10.1016/j.appet.2016.04.035.
- Meignié, A., Duclos, M., Carling, C., Orhant, E., Provost, P., Toussaint, J.-F., and Antero, J. 2021. The Effects of Menstrual Cycle Phase on Elite Athlete Performance: A Critical and Systematic Review. *Front. Physiol.* **12**. Frontiers. doi:10.3389/fphys.2021.654585.
- Melanson, E.L., Gavin, K.M., Shea, K.L., Wolfe, P., Wierman, M.E., Schwartz, R.S., and Kohrt, W.M. 2015. Regulation of energy expenditure by estradiol in premenopausal women. *J Appl Physiol* (1985) **119**(9): 975–981. doi:10.1152/jappphysiol.00473.2015.
- Melin, A.K., Heikura, I.A., Tenforde, A., and Mountjoy, M. 2019. Energy Availability in Athletics: Health, Performance, and Physique. *International Journal of Sport Nutrition & Exercise Metabolism* **29**(2): 152–164.
- Mendes, S.H., Tritto, A.C., Guilherme, J.P.L.F., Solis, M.Y., Vieira, D.E., Franchini, E., Lancha Jr., A.H., and Artioli, G.G. 2013. Effect of rapid weight loss on performance in combat sport male athletes: does adaptation to chronic weight cycling play a role? *British Journal of Sports Medicine* **47**(18): 1155–1160.
- Metz, L., Isacco, L., and Redman, L.M. 2022. Effect of oral contraceptives on energy balance in women: A review of current knowledge and potential cellular mechanisms. *Metabolism* **126**: 154919. doi:10.1016/j.metabol.2021.154919.
- Miguet, M., Masurier, J., Chaput, J.P., Pereira, B., Lambert, C., Dâmaso, A.R., Courteix, D., Duclos, M., Boirie, Y., and Thivel, D. 2019. Cognitive restriction accentuates the increased energy intake response to a 10-month multidisciplinary weight loss program in adolescents with obesity. *Appetite* **134**: 125–134. doi:10.1016/j.appet.2018.12.015.
- Mihm, M., Gangooly, S., and Muttukrishna, S. 2011. The normal menstrual cycle in women. *Animal Reproduction Science* **124**(3): 229–236. doi:10.1016/j.anireprosci.2010.08.030.
- Mikolajczyk, R.T., Maxwell, A.E., El Ansari, W., Stock, C., Petkeviciene, J., and Guillen-Grima, F. 2010. Relationship between perceived body weight and body mass index based on self-reported height and weight among university students: a cross-sectional study in seven European countries. *BMC Public Health* **10**: 40. doi:10.1186/1471-2458-10-40.
- Miles-Chan, J.L., and Isacco, L. 2021. Weight cycling practices in sport: A risk factor for later obesity? *Obes Rev* **22 Suppl 2**: e13188. doi:10.1111/obr.13188.
- Miller, K.K., Lawson, E.A., Mathur, V., Wexler, T.L., Meenaghan, E., Misra, M., Herzog, D.B., and Klibanski, A. 2007. Androgens in Women with Anorexia Nervosa and Normal-Weight Women with Hypothalamic Amenorrhea. *J Clin Endocrinol Metab* **92**(4): 1334–1339. doi:10.1210/jc.2006-2501.

- Mkumbuzi, N.S., Dlamini, S.B., Chibhabha, F., Govere, F.M., and Manda-Taylor, L. 2022. The menstrual cycle and football: The experiences of African women football players. *Sci Med Footb* **6**(5): 626–632. doi:10.1080/24733938.2021.2005252.
- Momma, R., Nakata, Y., Sawai, A., Takeda, M., Natsui, H., Mukai, N., and Watanabe, K. 2022. Comparisons of the Prevalence, Severity, and Risk Factors of Dysmenorrhea between Japanese Female Athletes and Non-Athletes in Universities. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **19**(1): 52. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. doi:10.3390/ijerph19010052.
- Montani, J.-P., Schutz, Y., and Dulloo, A.G. 2015. Dieting and weight cycling as risk factors for cardiometabolic diseases: who is really at risk? *Obes Rev* **16** **Suppl 1**: 7–18. doi:10.1111/obr.12251.
- Montani, J.-P., Viecelli, A.K., Prévot, A., and Dulloo, A.G. 2006. Weight cycling during growth and beyond as a risk factor for later cardiovascular diseases: the “repeated overshoot” theory. *Int J Obes (Lond)* **30** **Suppl 4**: S58-66. doi:10.1038/sj.ijo.0803520.
- Morehen, J.C., Langan-Evans, C., Hall, E.C.R., Close, G.L., and Morton, J.P. 2021. A 5-Year Analysis of Weight Cycling Practices in a Male World Champion Professional Boxer: Potential Implications for Obesity and Cardiometabolic Disease. *International Journal of Sport Nutrition & Exercise Metabolism* **31**(6): 507–513.
- Moriguti, J.C., Das, S.K., Saltzman, E., Corrales, A., McCrory, M.A., Greenberg, A.S., and Roberts, S.B. 2000. Effects of a 6-week hypocaloric diet on changes in body composition, hunger, and subsequent weight regain in healthy young and older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* **55**(12): B580-587. doi:10.1093/gerona/55.12.b580.
- Most, J., and Redman, L.M. 2020. Impact of calorie restriction on energy metabolism in humans. *Exp Gerontol* **133**: 110875. doi:10.1016/j.exger.2020.110875.
- Mountjoy, M., Ackerman, K.E., Bailey, D.M., Burke, L.M., Constantini, N., Hackney, A.C., Heikura, I.A., Melin, A., Pensgaard, A.M., Stellingwerff, T., Sundgot-Borgen, J.K., Torstveit, M.K., Jacobsen, A.U., Verhagen, E., Budgett, R., Engebretsen, L., and Erdener, U. 2023. 2023 International Olympic Committee’s (IOC) consensus statement on Relative Energy Deficiency in Sport (REDs). *Br J Sports Med* **57**(17): 1073–1098. BMJ Publishing Group Ltd and British Association of Sport and Exercise Medicine. doi:10.1136/bjsports-2023-106994.
- Mourier, A., Gautier, J.F., De Kerviler, E., Bigard, A.X., Villette, J.M., Garnier, J.P., Duvallet, A., Guezennec, C.Y., and Cathelineau, G. 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**(3): 385–391. doi:10.2337/diacare.20.3.385.
- Müller, M.J., and Bosy-Westphal, A. 2013. Adaptive thermogenesis with weight loss in humans. *Obesity (Silver Spring)* **21**(2): 218–228. doi:10.1002/oby.20027.
- Müller, M.J., Enderle, J., and Bosy-Westphal, A. 2016. Changes in Energy Expenditure with Weight Gain and Weight Loss in Humans. *Curr Obes Rep* **5**(4): 413–423. doi:10.1007/s13679-016-0237-4.
- Müller, M.J., Enderle, J., Pourhassan, M., Braun, W., Eggeling, B., Lagerpusch, M., Glüer, C.-C., Kehayias, J.J., Kiosz, D., and Bosy-Westphal, A. 2015. Metabolic adaptation to caloric restriction and subsequent refeeding: the Minnesota Starvation Experiment revisited. *Am J Clin Nutr* **102**(4): 807–819. doi:10.3945/ajcn.115.109173.
- Müller, M.J., and Seitz, H.J. 1981. Dose dependent stimulation of hepatic oxygen consumption and alanine conversion to CO₂ and glucose by 3,5,3'-triiodo-L-thyronine (T₃) in the isolated perfused liver of hypothyroid rats. *Life Sci* **28**(20): 2243–2249. doi:10.1016/0024-3205(81)90576-2.
- Nichols, J.F., Rauh, M.J., Barrack, M.T., Barkai, H.-S., and Pernick, Y. 2007. Disordered eating and menstrual irregularity in high school athletes in lean-build and nonlean-build sports. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* **17**(4): 364–377. doi:10.1123/ijsnem.17.4.364.

- Nicklas, B.J., Rogus, E.M., and Goldberg, A.P. 1997. Exercise blunts declines in lipolysis and fat oxidation after dietary-induced weight loss in obese older women. *Am J Physiol* **273**(1 Pt 1): E149-155. doi:10.1152/ajpendo.1997.273.1.E149.
- Niemeier, H.M., Phelan, S., Fava, J.L., and Wing, R.R. 2007. Internal disinhibition predicts weight regain following weight loss and weight loss maintenance. *Obesity (Silver Spring)* **15**(10): 2485–2494. doi:10.1038/oby.2007.295.
- Nunes, C.L., Carraça, E.V., Jesus, F., Finlayson, G., Francisco, R., Silva, M.N., Santos, I., Bosity-Westphal, A., Martins, P., Minderico, C., Sardinha, L.B., and Silva, A.M. 2022a. Changes in food reward and intuitive eating after weight loss and maintenance in former athletes with overweight or obesity. *Obesity* **30**(5): 1004–1014. doi:10.1002/oby.23407.
- Nunes, C.L., Casanova, N., Francisco, R., Bosity-Westphal, A., Hopkins, M., Sardinha, L.B., and Silva, A.M. 2022b. Does adaptive thermogenesis occur after weight loss in adults? A systematic review. *Br J Nutr* **127**(3): 451–469. doi:10.1017/S0007114521001094.
- O'Connor, H., and Slater, G. 2011. Losing, Gaining and Making Weight for Athletes. *In Sport and Exercise Nutrition*. John Wiley & Sons, Ltd. pp. 210–232. doi:10.1002/9781444344905.ch17.
- Oopik, V., Paasurke, M., Timpmann, S., Medijainen, L., Ereline, J., and Gapejeva, J. 2002. Effects of creatine supplementation during recovery from rapid body mass reduction on metabolism and muscle performance capacity in well-trained wrestlers. / Effets de la supplementation en creatine, lors de la recuperation suite a une perte rapide de la masse corporelle, sur le metabolisme et les capacites de performances musculaires chez des lutteurs bien entraines. *Journal of Sports Medicine & Physical Fitness* **42**(3): 330–339.
- Ööpik, V., Timpmann, S., Burk, A., and Hannus, I. 2013. Hydration status of Greco-Roman wrestlers in an authentic precompetition situation. *Appl Physiol Nutr Metab* **38**(6): 621–625. doi:10.1139/apnm-2012-0334.
- Oosthuyse, T., and Bosch, A.N. 2010. The effect of the menstrual cycle on exercise metabolism: implications for exercise performance in eumenorrhoeic women. *Sports Med* **40**(3): 207–227. doi:10.2165/11317090-000000000-00000.
- Oosthuyse, T., and Bosch, A.N. 2012. Oestrogen's regulation of fat metabolism during exercise and gender specific effects. *Curr Opin Pharmacol* **12**(3): 363–371. doi:10.1016/j.coph.2012.02.008.
- Oosthuyse, T., Strauss, J.A., and Hackney, A.C. 2023. Understanding the female athlete: molecular mechanisms underpinning menstrual phase differences in exercise metabolism. *Eur J Appl Physiol* **123**(3): 423–450. doi:10.1007/s00421-022-05090-3.
- Oppliger, R.A., Nelson Steen, S.A., and Scott, J.R. 2003. Weight Loss Practices of College Wrestlers. *International Journal of Sport Nutrition & Exercise Metabolism* **13**(1): 29.
- Oppliger, R.A., Utter, A.C., Scott, J.R., Dick, R.W., and Klossner, D. 2006. NCAA Rule Change Improves Weight Loss among National Championship Wrestlers. *Medicine & Science in Sports & Exercise* **38**(5): 963–970. ;
- Ordaz, D.L., Schaefer, L.M., Choquette, E., Schueler, J., Wallace, L., and Thompson, J.K. 2018. Thinness pressures in ethnically diverse college women in the United States. *Body Image* **24**: 1–4. doi:10.1016/j.bodyim.2017.11.004.
- Ortega-Santos, C.P., Barba-Moreno, L., Cupeiro, R., and Peinado, A.B. 2018. Substrate oxidation in female adults during endurance exercise throughout menstrual cycle phases: IronFEMME pilot study. *Journal of Human Sport and Exercise* **13**(3): 553–565. Jose A. Perez-Turpin & Juan M. Cortell-Tormo. doi:10.14198/jhse.2018.133.07.
- Oustric, P., Gibbons, C., Beaulieu, K., Blundell, J., and Finlayson, G. 2018. Changes in food reward during weight management interventions – a systematic review. *Obesity Reviews* **19**(12): 1642–1658. doi:10.1111/obr.12754.
- Palascha, A., van Kleef, E., and van Trijp, H.C.M. 2015. How does thinking in Black and White terms relate to eating behavior and weight regain? *J Health Psychol* **20**(5): 638–648. doi:10.1177/1359105315573440.

- Pardue, A., Trexler, E.T., and Sprod, L.K. 2017. Case Study: Unfavorable But Transient Physiological Changes During Contest Preparation in a Drug-Free Male Bodybuilder. *International Journal of Sport Nutrition & Exercise Metabolism* **27**(6): 550–559.
- Paul, R.W., Sonnier, J.H., Johnson, E.E., Hall, A.T., Osman, A., Connors, G.M., Freedman, K.B., and Bishop, M.E. 2023. Inequalities in the Evaluation of Male Versus Female Athletes in Sports Medicine Research: A Systematic Review. *Am J Sports Med* **51**(12): 3335–3342. doi:10.1177/03635465221131281.
- Payne, P.R., and Dugdale, A.E. 1977. Mechanisms for the control of body-weight. *Lancet* **1**(8011): 583–586. doi:10.1016/s0140-6736(77)92010-4.
- Pélissier, L., Bagot, S., Miles-Chan, J.L., Pereira, B., Boirie, Y., Duclos, M., Dulloo, A., Isacco, L., and Thivel, D. 2023a. Is dieting a risk for higher weight gain in normal-weight individual? A systematic review and meta-analysis. *Br J Nutr* **130**(7): 1190–1212. doi:10.1017/S0007114523000132.
- Pélissier, L., Ennequin, G., Bagot, S., Pereira, B., Lachèze, T., Duclos, M., Thivel, D., Miles-Chan, J., and Isacco, L. 2023b. Lightest weight-class athletes are at higher risk of weight regain: results from the French-Rapid Weight Loss Questionnaire. *The Physician and Sportsmedicine*. Taylor & Francis.
- Pelkman, C.L., Chow, M., Heinbach, R.A., and Rolls, B.J. 2001. Short-term effects of a progestational contraceptive drug on food intake, resting energy expenditure, and body weight in young women. *Am J Clin Nutr* **73**(1): 19–26. doi:10.1093/ajcn/73.1.19.
- Pereira, S., Cline, D.L., Glavas, M.M., Covey, S.D., and Kieffer, T.J. 2020. Tissue-Specific Effects of Leptin on Glucose and Lipid Metabolism. *Endocr Rev* **42**(1): 1–28. doi:10.1210/endrev/bnaa027.
- Pérez-Martin, A., Dumortier, M., Raynaud, E., Brun, J.F., Fédou, C., Bringer, J., and Mercier, J. 2001. Balance of substrate oxidation during submaximal exercise in lean and obese people. *Diabetes Metab* **27**(4 Pt 1): 466–474.
- Pettersson, S., Pipping Ekström, M., and Berg, C.M. 2013. Practices of Weight Regulation Among Elite Athletes in Combat Sports: A Matter of Mental Advantage? *Journal of Athletic Training* (Allen Press) **48**(1): 99–108.
- Picardo, C.M., Nichols, M., Edelman, A., and Jensen, J.T. 2003. Women's knowledge and sources of information on the risks and benefits of oral contraception. *J Am Med Womens Assoc* (1972) **58**(2): 112–116.
- Pietiläinen, K.H., Saarni, S.E., Kaprio, J., and Rissanen, A. 2012. Does dieting make you fat? A twin study. *Int J Obes (Lond)* **36**(3): 456–464. doi:10.1038/ijo.2011.160.
- Pinel, C.J.J., Mehta, R., and Okholm Kryger, K. 2022. The impact and experienced barriers menstruation present to football participation in amateur female footballers. *Journal of Sports Sciences* **40**(17): 1950–1963. doi:10.1080/02640414.2022.2122328.
- Pocecco, E., Ruedl, G., Stankovic, N., Sterkowicz, S., Del Vecchio, F.B., Gutiérrez-García, C., Rousseau, R., Wolf, M., Kopp, M., Miarka, B., Menz, V., Krüsmann, P., Calmet, M., Malliaropoulos, N., and Burtscher, M. 2013. Injuries in judo: a systematic literature review including suggestions for prevention. *Br J Sports Med* **47**(18): 1139–1143. doi:10.1136/bjsports-2013-092886.
- Poehlman, E.T., Denino, W.F., Beckett, T., Kinaman, K.A., Dionne, I.J., Dvorak, R., and Ades, P.A. 2002. Effects of Endurance and Resistance Training on Total Daily Energy Expenditure in Young Women: A Controlled Randomized Trial. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* **87**(3): 1004–1009. doi:10.1210/jcem.87.3.8282.
- Prado, R.C.R., Hackney, A.C., Silveira, R., Kilpatrick, M.W., Takito, M.Y., and Asano, R.Y. 2024. Effect of Menstrual Cycle Phase on Perceived Exertion During Aerobic Exercise in Eumenorrheic Women: A Systematic Review and Meta-analysis. *J Womens Pelvic Health Phys Ther* **48**(2): 91–102.
- Procter-Gray, E., Cobb, K.L., Crawford, S.L., Bachrach, L.K., Chirra, A., Sowers, M., Greendale, G.A., Nieves, J.W., Kent, K., and Kelsey, J.L. 2008. Effect of oral contraceptives on weight and body

- composition in young female runners. *Med Sci Sports Exerc* **40**(7): 1205–1212. doi:10.1249/MSS.0b013e31816a0df6.
- Prouteau, S., Benhamou, L., and Courteix, D. 2006a. Relationships between serum leptin and bone markers during stable weight, weight reduction and weight regain in male and female judoists. *Eur J Endocrinol* **154**(3): 389–395. doi:10.1530/eje.1.02103.
- Prouteau, S., Ducher, G., Serbescu, C., Benhamou, L., and Courteix, D. 2007. Gender differences in response to weight cycling in elite judoists. *Biology of Sport* **24**.
- Prouteau, S., Pelle, A., Collomp, K., Benhamou, L., and Courteix, D. 2006b. Bone Density in Elite Judoists and Effects of Weight Cycling on Bone Metabolic Balance. *Medicine & Science in Sports & Exercise* **38**(4): 694–700. ;
- Rael, B., Romero-Parra, N., Alfaro-Magallanes, V.M., Barba-Moreno, L., Cupeiro, R., Janse de Jonge, X., Peinado, A.B., and IronFEMME Study Group. 2021. Body Composition Over the Menstrual and Oral Contraceptive Cycle in Trained Females. *Int J Sports Physiol Perform* **16**(3): 375–381. doi:10.1123/ijsp.2020-0038.
- Ransone, J., Hughes, B., and Foster, D.T. 2004. Body-weight fluctuation in collegiate wrestlers: Implications of the National Collegiate Athletic Association weight-certification program. *J. Athl. Train.* **39**(2): 162–168.
- Redman, L.M., Scroop, G.C., Westlander, G., and Norman, R.J. 2005. Effect of a Synthetic Progestin on the Exercise Status of Sedentary Young Women. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* **90**(7): 3830–3837. doi:10.1210/jc.2004-2401.
- Redman, L.M., Smith, S.R., Burton, J.H., Martin, C.K., Il'yasova, D., and Ravussin, E. 2018. Metabolic Slowing and Reduced Oxidative Damage with Sustained Caloric Restriction Support the Rate of Living and Oxidative Damage Theories of Aging. *Cell Metab* **27**(4): 805-815.e4. doi:10.1016/j.cmet.2018.02.019.
- Reichenberger, J., Schnepfer, R., Arend, A.-K., and Blechert, J. 2020. Emotional eating in healthy individuals and patients with an eating disorder: evidence from psychometric, experimental and naturalistic studies. *Proceedings of the Nutrition Society* **79**(3): 290–299. doi:10.1017/S0029665120007004.
- Reljic, D., Jost, J., Dickau, K., Kinscherf, R., Bonaterra, G., and Friedmann-Bette, B. 2015. Effects of pre-competitive rapid weight loss on nutrition, vitamin status and oxidative stress in elite boxers. *Journal of Sports Sciences* **33**(5): 437–448.
- Reynisdottir, S., Langin, D., Carlström, K., Holm, C., Rössner, S., and Arner, P. 1995. Effects of weight reduction on the regulation of lipolysis in adipocytes of women with upper-body obesity. *Clin Sci (Lond)* **89**(4): 421–429. doi:10.1042/cs0890421.
- Richards, J.S. 2018. Chapter One - The Ovarian Cycle. *In Vitamins and Hormones. Edited by G. Litwack.* Academic Press. pp. 1–25. doi:10.1016/bs.vh.2018.01.009.
- Rich-Edwards, J., and Morton, S. 2002. A life course approach to women's reproductive health. *In A Life Course Approach to Women's Health. Edited by D. Kuh and R. Hardy.* Oxford University Press. p. 0. doi:10.1093/acprof:oso/9780192632890.003.0002.
- Roberts, S.B., Fuss, P., Heyman, M.B., Evans, W.J., Tsay, R., Rasmussen, H., Fiatarone, M., Cortiella, J., Dallal, G.E., and Young, V.R. 1994. Control of food intake in older men. *JAMA* **272**(20): 1601–1606. doi:10.1001/jama.1994.03520200057036.
- Robinson, S.L., Chambers, E.S., Fletcher, G., and Wallis, G.A. 2016. Lipolytic Markers, Insulin and Resting Fat Oxidation are Associated with Maximal Fat Oxidation. *International Journal of Sports Medicine* **37**(8): 607–613.
- Rogan, M.M., and Black, K.E. 2022. Dietary energy intake across the menstrual cycle: a narrative review. *Nutr Rev* **81**(7): 869–886. doi:10.1093/nutrit/nuac094.
- Romijn, J.A., Coyle, E.F., Sidossis, L.S., Gastaldelli, A., Horowitz, J.F., Endert, E., and Wolfe, R.R. 1993. Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration. *Am J Physiol* **265**(3 Pt 1): E380-391. doi:10.1152/ajpendo.1993.265.3.E380.

- Rosenbaum, M., and Foster, G. 2023. Differential mechanisms affecting weight loss and weight loss maintenance. *Nat Metab* **5**(8): 1266–1274. Nature Publishing Group. doi:10.1038/s42255-023-00864-1.
- Rosenbaum, M., Hirsch, J., Murphy, E., and Leibel, R.L. 2000. Effects of changes in body weight on carbohydrate metabolism, catecholamine excretion, and thyroid function. *Am J Clin Nutr* **71**(6): 1421–1432. doi:10.1093/ajcn/71.6.1421.
- Rosenbaum, M., and Leibel, R.L. 2010. Adaptive thermogenesis in humans. *Int J Obes (Lond)* **34**(0 1): S47–S55. doi:10.1038/ijo.2010.184.
- Rossov, L.M., Fukuda, D.H., Fahs, C.A., Loenneke, J.P., and Stout, J.R. 2013. Natural bodybuilding competition preparation and recovery: a 12-month case study. *Int J Sports Physiol Perform* **8**(5): 582–592. doi:10.1123/ijsp.8.5.582.
- Roth, C., Schoenfeld, B.J., and Behringer, M. 2022. Lean mass sparing in resistance-trained athletes during caloric restriction: the role of resistance training volume. *Eur J Appl Physiol* **122**(5): 1129–1151. doi:10.1007/s00421-022-04896-5.
- Saarni, S.E., Rissanen, A., Sarna, S., Koskenvuo, M., and Kaprio, J. 2006. Weight cycling of athletes and subsequent weight gain in middleage. *Int J Obes (Lond)* **30**(11): 1639–1644. doi:10.1038/sj.ijo.0803325.
- Sagayama, H., Yoshimura, E., Yamada, Y., Ichikawa, M., Ebine, N., Higaki, Y., Kiyonaga, A., and Tanaka, H. 2014. Effects of rapid weight loss and regain on body composition and energy expenditure. *Applied Physiology, Nutrition & Metabolism* **39**(1): 21–27.
- Sagayama, H., Yoshimura, E., Yamada, Y., and Tanaka, H. 2019. The effects of rapid weight loss and 3-h recovery on energy expenditure, carbohydrate, and fat oxidation in boxing athletes. *J Sports Med Phys Fitness* **59**(6): 1018–1025. doi:10.23736/S0022-4707.18.08677-2.
- Sainsbury, K., Evans, E.H., Pedersen, S., Marques, M.M., Teixeira, P.J., Lähteenmäki, L., Stubbs, R.J., Heitmann, B.L., and Sniehotta, F.F. 2019. Attribution of weight regain to emotional reasons amongst European adults with overweight and obesity who regained weight following a weight loss attempt. *Eat Weight Disord* **24**(2): 351–361. doi:10.1007/s40519-018-0487-0.
- Sanaya, N., Janusaite, M., Dalamaga, M., and Magkos, F. 2024. The Physiological Effects of Weight-Cycling: A Review of Current Evidence. *Curr Obes Rep* **13**(1): 35–50. doi:10.1007/s13679-023-00539-8.
- Sares-Jäske, L., Knekt, P., Männistö, S., Lindfors, O., and Heliövaara, M. 2019. Self-report dieting and long-term changes in body mass index and waist circumference. *Obes Sci Pract* **5**(4): 291–303. doi:10.1002/osp4.336.
- Sarin, H.V., Gudelj, I., Honkanen, J., Ihalainen, J.K., Vuorela, A., Lee, J.H., Jin, Z., Terwilliger, J.D., Isola, V., Ahtiainen, J.P., Häkkinen, K., Jurić, J., Lauc, G., Kristiansson, K., Hulmi, J.J., and Perola, M. 2019. Molecular Pathways Mediating Immunosuppression in Response to Prolonged Intensive Physical Training, Low-Energy Availability, and Intensive Weight Loss. *Front Immunol* **10**: 907. doi:10.3389/fimmu.2019.00907.
- Sarlio-Lähteenkorva, S., and Rissanen, A. 1998. Weight loss maintenance: determinants of long-term success. *Eat Weight Disord* **3**(3): 131–135. doi:10.1007/BF03340000.
- Schaumberg, M.A., Emmerton, L.M., Jenkins, D.G., Burton, N.W., Janse de Jonge, X.A.K., and Skinner, T.L. 2018. Use of Oral Contraceptives to Manipulate Menstruation in Young, Physically Active Women. *Int J Sports Physiol Perform* **13**(1): 82–87. doi:10.1123/ijsp.2016-0689.
- Schroll, J.B., Black, A.Y., Farquhar, C., and Chen, I. 2023. Combined oral contraceptive pill for primary dysmenorrhoea. *Cochrane Database Syst Rev* **2023**(7): CD002120. doi:10.1002/14651858.CD002120.pub4.
- Schutz, Y., Tremblay, A., Weinsier, R., and Nelson, K. 1992. Role of fat oxidation in the long-term stabilization of body weight in obese women. *The American Journal of Clinical Nutrition* **55**(3): 670–674. doi:10.1093/ajcn/55.3.670.
- Schwartz, A., and Doucet, E. 2010. Relative changes in resting energy expenditure during weight loss: a systematic review. *Obes Rev* **11**(7): 531–547. doi:10.1111/j.1467-789X.2009.00654.x.

- Schwartz, C., King, N.A., Perreira, B., Blundell, J.E., and Thivel, D. 2017. A systematic review and meta-analysis of energy and macronutrient intake responses to physical activity interventions in children and adolescents with obesity. *Pediatric Obesity* **12**(3): 179–194. doi:10.1111/ijpo.12124.
- Sedeaud, A., Marc, A., Marck, A., Dor, F., Schipman, J., Dorsey, M., Haida, A., Berthelot, G., and Toussaint, J.-F. 2014. BMI, a Performance Parameter for Speed Improvement. *PLOS ONE* **9**(2): e90183. Public Library of Science. doi:10.1371/journal.pone.0090183.
- Siedler, M.R., Lewis, M.H., Trexler, E.T., Lamadrid, P., Waddell, B.J., Bishop, S.F., SanFilippo, G., Callahan, K., Mathas, D., Mastrofini, G.F., Henselmans, M., Vårvik, F.T., and Campbell, B.I. 2023. The Effects of Intermittent Diet Breaks during 25% Energy Restriction on Body Composition and Resting Metabolic Rate in Resistance-Trained Females: A Randomized Controlled Trial. *J Hum Kinet* **86**: 117–132. doi:10.5114/jhk/159960.
- Silberstein, S.D., and Merriam, G.R. 2000. Physiology of the Menstrual Cycle. *Cephalalgia* **20**(3): 148–154. SAGE Publications Ltd STM. doi:10.1046/j.1468-2982.2000.00034.x.
- Silva, A.M., Matias, C.N., Santos, D.A., Rocha, P.M., Minderico, C.S., Thomas, D., Heymsfield, S.B., and Sardinha, L.B. 2017. Do Dynamic Fat and Fat-Free Mass Changes follow Theoretical Driven Rules in Athletes? *Med Sci Sports Exerc* **49**(10): 2086–2092. doi:10.1249/MSS.0000000000001332.
- Silvestri, E., Schiavo, L., Lombardi, A., and Goglia, F. 2005. Thyroid hormones as molecular determinants of thermogenesis. *Acta Physiol Scand* **184**(4): 265–283. doi:10.1111/j.1365-201X.2005.01463.x.
- Sims, S.T., and Heather, A.K. 2018. Myths and Methodologies: Reducing scientific design ambiguity in studies comparing sexes and/or menstrual cycle phases. *Experimental Physiology* **103**(10): 1309–1317. doi:10.1113/EP086797.
- Siri, W.E. 1993. Body composition from fluid spaces and density: analysis of methods. 1961. *Nutrition* **9**(5): 480–491; discussion 480, 492.
- Sladek, C.D. 1974. Gluconeogenesis and hepatic glycogen formation in relation to the rat estrous cycle. *Horm Metab Res* **6**(3): 217–221. doi:10.1055/s-0028-1093856.
- Smith, W.J., Underwood, L.E., and Clemmons, D.R. 1995. Effects of caloric or protein restriction on insulin-like growth factor-I (IGF-I) and IGF-binding proteins in children and adults. *J Clin Endocrinol Metab* **80**(2): 443–449. doi:10.1210/jcem.80.2.7531712.
- Solli, G.S., Sandbakk, S.B., Noordhof, D.A., Ihalainen, J.K., and Sandbakk, Ø. 2020. Changes in Self-Reported Physical Fitness, Performance, and Side Effects Across the Phases of the Menstrual Cycle Among Competitive Endurance Athletes. *Int J Sports Physiol Perform* **15**(9): 1324–1333. doi:10.1123/ijsp.2019-0616.
- Stachenfeld, N.S. 2008. Sex Hormone Effects on Body Fluid Regulation. *Exerc Sport Sci Rev* **36**(3): 152–159. doi:10.1097/JES.0b013e31817be928.
- Stachenfeld, N.S., DiPietro, L., Kokoszka, C.A., Silva, C., Keefe, D.L., and Nadel, E.R. 1999. Physiological variability of fluid-regulation hormones in young women. *Journal of Applied Physiology* **86**(3): 1092–1096. doi:10.1152/jappl.1999.86.3.1092.
- Stachenfeld, N.S., and Taylor, H.S. 2004. Effects of estrogen and progesterone administration on extracellular fluid. *J Appl Physiol* (1985) **96**(3): 1011–1018. doi:10.1152/japplphysiol.01032.2003.
- Stachoń, A.J. 2016. Menstrual Changes in Body Composition of Female Athletes. *Coll Antropol* **40**(2): 111–122.
- Steen, S.N. 1988. Metabolic Effects of Repeated Weight Loss and Regain in Adolescent Wrestlers. *JAMA* **260**(1): 47. doi:10.1001/jama.1988.03410010055034.
- Steen, S.N. 1991. Precontest strategies of a male bodybuilder. *International Journal of Sport Nutrition* **1**(1): 69–78. ;
- Steen, S.N., and Brownell, K.D. 1990. Patterns of weight loss and regain in wrestlers: has the tradition changed? / Modalites de perte de poids et de reprise de poids chez des lutteurs: la tradition a-t-elle change ? *Medicine & Science in Sports & Exercise* **22**(6): 762–768. ;

- Steiner, B.M., and Berry, D.C. 2022. The Regulation of Adipose Tissue Health by Estrogens. *Front Endocrinol (Lausanne)* **13**: 889923. doi:10.3389/fendo.2022.889923.
- Steward, R.G., Bateman, L.A., Slentz, C., Stanczyk, F.Z., and Price, T.M. 2016. The impact of short-term depot-medroxyprogesterone acetate treatment on resting metabolic rate. *Contraception* **93**(4): 317–322. doi:10.1016/j.contraception.2016.01.001.
- Stojek, M.M.K., and MacKillop, J. 2017. Relative reinforcing value of food and delayed reward discounting in obesity and disordered eating: A systematic review. *Clinical Psychology Review* **55**: 1–11. doi:10.1016/j.cpr.2017.04.007.
- Stricker, R., Eberhart, R., Chevailler, M.-C., Quinn, F.A., Bischof, P., and Stricker, R. 2006. Establishment of detailed reference values for luteinizing hormone, follicle stimulating hormone, estradiol, and progesterone during different phases of the menstrual cycle on the Abbott ARCHITECT® analyzer. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (CCLM)* **44**(7): 883–887. De Gruyter. doi:10.1515/CCLM.2006.160.
- van Strien, T., Herman, C.P., and Verheijden, M.W. 2014. Dietary restraint and body mass change. A 3-year follow up study in a representative Dutch sample. *Appetite* **76**: 44–49. doi:10.1016/j.appet.2014.01.015.
- Stubbs, R.J., Hopkins, M., Finlayson, G.S., Duarte, C., Gibbons, C., and Blundell, J.E. 2018. Potential effects of fat mass and fat-free mass on energy intake in different states of energy balance. *Eur J Clin Nutr* **72**(5): 698–709. Nature Publishing Group. doi:10.1038/s41430-018-0146-6.
- Stubbs, R.J., and Turicchi, J. 2021. From famine to therapeutic weight loss: Hunger, psychological responses, and energy balance-related behaviors. *Obes Rev* **22 Suppl 2**: e13191. doi:10.1111/obr.13191.
- Stunkard, A.J., and Messick, S. 1985. The three-factor eating questionnaire to measure dietary restraint, disinhibition and hunger. *J Psychosom Res* **29**(1): 71–83. doi:10.1016/0022-3999(85)90010-8.
- Suh, S.-H., Casazza, G.A., Horning, M.A., Miller, B.F., and Brooks, G.A. 2002. Luteal and follicular glucose fluxes during rest and exercise in 3-h postabsorptive women. *Journal of Applied Physiology* **93**(1): 42–50. doi:10.1152/jappphysiol.01080.2001.
- Suh, S.-H., Casazza, G.A., Horning, M.A., Miller, B.F., and Brooks, G.A. 2003. Effects of oral contraceptives on glucose flux and substrate oxidation rates during rest and exercise. *Journal of Applied Physiology* **94**(1): 285–294. American Physiological Society. doi:10.1152/jappphysiol.00693.2002.
- Sundgot-Borgen, J., and Garthe, I. 2011a. Elite athletes in aesthetic and Olympic weight-class sports and the challenge of body weight and body compositions. *J Sports Sci* **29 Suppl 1**: S101-114. doi:10.1080/02640414.2011.565783.
- Sundgot-Borgen, J., and Garthe, I. 2011b. Eating Disorders and Athletes. *In Sport and Exercise Nutrition*. John Wiley & Sons, Ltd. pp. 233–243. doi:10.1002/9781444344905.ch18.
- Sundgot-Borgen, J., Meyer, N.L., Lohman, T.G., Ackland, T.R., Maughan, R.J., Stewart, A.D., and Müller, W. 2013. How to minimise the health risks to athletes who compete in weight-sensitive sports review and position statement on behalf of the Ad Hoc Research Working Group on Body Composition, Health and Performance, under the auspices of the IOC Medical Commission. *Br J Sports Med* **47**(16): 1012–1022. BMJ Publishing Group Ltd and British Association of Sport and Exercise Medicine. doi:10.1136/bjsports-2013-092966.
- Sundgot-Borgen, J., and Torstveit, M.K. 2004. Prevalence of eating disorders in elite athletes is higher than in the general population. *Clin J Sport Med* **14**(1): 25–32. doi:10.1097/00042752-200401000-00005.
- Sung, E., Han, A., Hinrichs, T., Vorgerd, M., Manchado, C., and Platen, P. 2014. Effects of follicular versus luteal phase-based strength training in young women. *Springerplus* **3**: 668. doi:10.1186/2193-1801-3-668.
- Szmulowicz, E.D., Adler, G.K., Williams, J.S., Green, D.E., Yao, T.M., Hopkins, P.N., and Seely, E.W. 2006. Relationship between aldosterone and progesterone in the human menstrual cycle. *J Clin Endocrinol Metab* **91**(10): 3981–3987. doi:10.1210/jc.2006-1154.

- Szyba, and Montella. 2000. *Biologie de la reproduction humaine*. Sauramps Médical.
- Tappy, L. 1996. Thermic effect of food and sympathetic nervous system activity in humans. *Reprod Nutr Dev* **36**(4): 391–397. doi:10.1051/rnd:19960405.
- Tarnopolsky, M.A. 2008. Sex differences in exercise metabolism and the role of 17-beta estradiol. *Med Sci Sports Exerc* **40**(4): 648–654. doi:10.1249/MSS.0b013e31816212ff.
- Teal, S., and Edelman, A. 2021. Contraception Selection, Effectiveness, and Adverse Effects: A Review. *JAMA* **326**(24): 2507–2518. doi:10.1001/jama.2021.21392.
- Thivel, D., Julian, V., Miguet, M., Pereira, B., Beaulieu, K., Finlayson, G., Richard, R., and Duclos, M. 2020. Introducing eccentric cycling during a multidisciplinary weight loss intervention might prevent adolescents with obesity from increasing their food intake: The TEXTOO study. *Physiol Behav* **214**: 112744. doi:10.1016/j.physbeh.2019.112744.
- Thivel, D., Metz, L., Julian, V., Isacco, L., Verney, J., Ennequin, G., Charlot, K., Beaulieu, K., Finlayson, G., and King, J.A. 2021. Diet- but not exercise-induced iso-energetic deficit induces compensatory appetitive responses. *Eur J Clin Nutr* **75**(10): 1425–1432. doi:10.1038/s41430-020-00853-7.
- Thivel, D., Oustric, P., Beaulieu, K., Moore, H., Bonjean, L., Loglisci, J., Georges, M., Miyashita, M., Boirie, Y., Pereira, B., and Finlayson, G. 2023. Development, sensitivity and reliability of a French version of the Leeds food preference questionnaire (LFPQ-fr) for the evaluation of food preferences and reward. *Physiol Behav* **267**: 114187. doi:10.1016/j.physbeh.2023.114187.
- Thompson, B.M., Hillebrandt, H.L., Sculley, D.V., Barba-Moreno, L., and Janse de Jonge, X.A.K. 2021. The acute effect of the menstrual cycle and oral contraceptive cycle on measures of body composition. *Eur J Appl Physiol* **121**(11): 3051–3059. doi:10.1007/s00421-021-04771-9.
- Tinsley, G.M., Trexler, E.T., Smith-Ryan, A.E., Paoli, A., Graybeal, A.J., Campbell, B.I., and Schoenfeld, B.J. 2019. Changes in Body Composition and Neuromuscular Performance Through Preparation, 2 Competitions, and a Recovery Period in an Experienced Female Physique Athlete. *J Strength Cond Res* **33**(7): 1823–1839. doi:10.1519/JSC.0000000000002758.
- Tipton, K.D., and Wolfe, R.R. 2004. Protein and amino acids for athletes. *J Sports Sci* **22**(1): 65–79. doi:10.1080/0264041031000140554.
- Tomazo-Ravnik, T., and Jakopič, V. 2006. Changes in Total Body Water and Body Fat in Young Women in the Course of Menstrual Cycle. *Intl Jnl Anthropology* **21**(1): 55–60. doi:10.1007/s11599-006-9007-0.
- Torstveit, M.K., and Sundgot-Borgen, J. 2005. Participation in leanness sports but not training volume is associated with menstrual dysfunction: a national survey of 1276 elite athletes and controls. *Br J Sports Med* **39**(3): 141–147. doi:10.1136/bjism.2003.011338.
- Tracy, E.E. 2017. Contraception: Menarche to Menopause. *Obstetrics and Gynecology Clinics of North America* **44**(2): 143–158. doi:10.1016/j.ogc.2017.02.001.
- Tremblay, A., Royer, M.-M., Chaput, J.-P., and Doucet, E. 2013. Adaptive thermogenesis can make a difference in the ability of obese individuals to lose body weight. *Int J Obes (Lond)* **37**(6): 759–764. doi:10.1038/ijo.2012.124.
- Trémollières, F. 2012. Contraception orale estro-progestative : quelle différence entre éthinylestradiol et estradiol ? *Gynécologie Obstétrique & Fertilité* **40**(2): 109–115. doi:10.1016/j.gyobfe.2011.10.009.
- Trexler, E.T., Smith-Ryan, A.E., and Norton, L.E. 2014. Metabolic adaptation to weight loss: implications for the athlete. *Journal of the International Society of Sports Nutrition* **11**(1): 7. doi:10.1186/1550-2783-11-7.
- Utter, A., and Kang, J. 1998. Acute weight gain and performance in college wrestlers. *Journal of Strength & Conditioning Research (Allen Press Publishing Services Inc.)* **12**(3): 157–160. ;
- Väänänen, H.K., and Härkönen, P.L. 1996. Estrogen and bone metabolism. *Maturitas* **23 Suppl**: S65-69. doi:10.1016/0378-5122(96)01015-8.

- Vaiksaar, S., Jürimäe, J., Mäestu, J., Purge, P., Kalytka, S., Shakhlina, L., and Jürimäe, T. 2011a. No effect of menstrual cycle phase on fuel oxidation during exercise in rowers. *Eur J Appl Physiol* **111**(6): 1027–1034. doi:10.1007/s00421-010-1730-1.
- Vaiksaar, S., Jürimäe, J., Mäestu, J., Purge, P., Kalytka, S., Shakhlina, L., and Jürimäe, T. 2011b. No effect of menstrual cycle phase and oral contraceptive use on endurance performance in rowers. *J Strength Cond Res* **25**(6): 1571–1578. doi:10.1519/JSC.0b013e3181df7fd2.
- Vaiksaar, S., Jürimäe, J., Mäestu, J., Purge, P., Kalytka, S., Shakhlina, L., and Jürimäe, T. 2011c. Phase of oral contraceptive cycle and endurance capacity of rowers. *Percept Mot Skills* **113**(3): 764–772. doi:10.2466/05.06.PMS.113.6.764-772.
- Van Wye, G., Dubin, J.A., Blair, S.N., and Di Pietro, L. 2007. Weight cycling and 6-year weight change in healthy adults: The Aerobics Center Longitudinal Study. *Obesity* **15**(3): 731–739. North American Assn for the Study of Obesity (NAASO), US. doi:10.1038/oby.2007.598.
- Vieira-Potter, V.J., Zidon, T.M., and Padilla, J. 2015. Exercise (and Estrogen) Make Fat Cells “Fit.” *Exerc Sport Sci Rev* **43**(3): 172–178. doi:10.1249/JES.0000000000000046.
- Vigil, P., Meléndez, J., Petkovic, G., and Del Río, J.P. 2022. The importance of estradiol for body weight regulation in women. *Front Endocrinol (Lausanne)* **13**: 951186. doi:10.3389/fendo.2022.951186.
- Weeke, J., and Hansen, A.P. 1975. Serum tsh and serum t3 levels during normal menstrual cycles and during cycles on oral contraceptives. *Acta Endocrinol (Copenh)* **79**(3): 431–438. doi:10.1530/acta.0.0790431.
- Westerterp, K.R. 2013. Physical activity and physical activity induced energy expenditure in humans: measurement, determinants, and effects. *Front Physiol* **4**: 90. doi:10.3389/fphys.2013.00090.
- Weyer, C., Bogardus, C., and Pratley, R.E. 1999. Metabolic factors contributing to increased resting metabolic rate and decreased insulin-induced thermogenesis during the development of type 2 diabetes. *Diabetes* **48**(8): 1607–1614. doi:10.2337/diabetes.48.8.1607.
- Wohlgemuth, K.J., Arieta, L.R., Brewer, G.J., Hoselton, A.L., Gould, L.M., and Smith-Ryan, A.E. 2021. Sex differences and considerations for female specific nutritional strategies: a narrative review. *Journal of the International Society of Sports Nutrition* **18**(1): 27. doi:10.1186/s12970-021-00422-8.
- Zderic, T.W., Coggan, A.R., and Ruby, B.C. 2001. Glucose kinetics and substrate oxidation during exercise in the follicular and luteal phases. *J Appl Physiol (1985)* **90**(2): 447–453. doi:10.1152/jappl.2001.90.2.447.
- Zhang, H., Tamakoshi, K., Yatsuya, H., Murata, C., Wada, K., Otsuka, R., Nagasawa, N., Ishikawa, M., Sugiura, K., Matsushita, K., Hori, Y., Kondo, T., and Toyoshima, H. 2005. Long-term body weight fluctuation is associated with metabolic syndrome independent of current body mass index among Japanese men. *Circ J* **69**(1): 13–18. doi:10.1253/circj.69.13.
- Zubac, D., Karnincic, H., and Sekulic, D. 2018. Rapid Weight Loss Is Not Associated With Competitive Success in Elite Youth Olympic-Style Boxers in Europe. *International Journal of Sports Physiology & Performance* **13**(7): 860–866.
- Zurlo, F., Lillioja, S., Esposito-Del Puente, A., Nyomba, B.L., Raz, I., Saad, M.F., Swinburn, B.A., Knowler, W.C., Bogardus, C., and Ravussin, E. 1990. Low ratio of fat to carbohydrate oxidation as predictor of weight gain: study of 24-h RQ. *Am J Physiol* **259**(5 Pt 1): E650-657. doi:10.1152/ajpendo.1990.259.5.E650.

RÉSUMÉ

Les athlètes développent des adaptations physiologiques en réponse à leur niveau d'activité physique élevé qui peuvent être modulées par divers facteurs. Parmi eux, la pratique du « *weight cycling* »—associée à une reprise excessive de masse grasse dans la population non-sportive—et le statut hormonal ovarien sont susceptibles d'interférer avec les adaptations énergétiques, mais demeurent encore peu étudiés dans un contexte sportif. Ainsi, l'objectif de ce travail de thèse est d'examiner les adaptations énergétiques en réponse aux variations de poids et au statut hormonal ovarien chez les athlètes. Le suivi d'athlètes habitués au « *weight cycling* » a révélé des adaptations métaboliques et nutritionnelles transitoires en réponse à une perte et reprise de poids modérées, sans reprise excessive de masse grasse à l'issue de la reprise de poids. Les différences observées n'écartent toutefois pas un risque de (re)prise de poids et de masse grasse à plus long terme, en particulier chez les athlètes d'endurance, et de développement de troubles alimentaires chez les femmes et les athlètes pratiquant un sport de combat. Par ailleurs, compte tenu des difficultés méthodologiques pour étudier les spécificités hormonales chez les athlètes féminines, un questionnaire auto-rapporté a été développé pour caractériser leur statut hormonal ovarien et leurs pratiques de variation de poids. D'après le suivi d'athlètes féminines en période de haute charge d'entraînement, le statut hormonal ovarien semblerait influencer le métabolisme énergétique à l'exercice, mais pas au repos à jeun et après un repas. Ce travail de doctorat a ainsi permis de formuler des premières recommandations dans la prise en charge de l'entraînement et la nutrition des athlètes afin d'optimiser leur santé et leur performance, tout en considérant leurs caractéristiques individuelles.

ABSTRACT

Athletes develop physiological adaptations in response to their high physical activity level, which can be influenced by various factors. Among these, the practice of weight cycling—often associated with excessive fat regain in non-athletic populations—and ovarian hormonal status are factors that may interfere with the energy adaptations, remaining underexplored in the athletic context. Thus, the aim of this PhD thesis is to examine energy adaptations in response to weight variations and ovarian hormonal status in athletes. The follow-up of athletes used to weight cycling highlighted transient metabolic and nutritional adaptations in response to moderate weight loss and regain, without excessive fat regain at the end of the weight regain. However, the observed differences suggest a potential long-term risk of weight and fat (re)gain, particularly in endurance athletes, and the development of disordered eating in female athletes and those involved in combat sports. Moreover, given the methodological challenges in studying the hormonal specifics of female athletes, a self-reported questionnaire was developed to characterize their ovarian hormonal status and weight fluctuation practices. The monitoring of female athletes during a high training load period suggested that ovarian hormonal status may influence energy metabolism during exercise, but not at rest in a fasted state as postprandially. This doctoral work has thus led to the formulation of preliminary recommendations in the management of the training and nutrition of athletes to optimize their health and performance, considering their individual characteristics.