

ADOLESCENCE ET RED-S : PÉRIODE À RISQUE ?

ADOLESCENCE AND RED-S: A PERIOD OF RISK?

Alexandre Dondonne^a, Jean-François Kaux^{a,b}, Johan Bellemans^c, Anne-Sophie Johnen^d

^a*Université de Liège, Liège, Belgique*

^b*Service de médecine physique et du département de traumatologie du sport, SportS²*

^c*Département d'orthopédie et de traumatologie des hôpitaux universitaires catholiques de Louvain, clinique sportive belge GRIT de Louvain, GRIT Belgian Sports, Arthroclinic, Louvain, Belgique*

^d*Centre de formation à la thérapie familiale, service de psychologie clinique et d'Action Sociale, CHU de Liège, Liège, Belgique*

Mots-clés :

RED-S syndrome, Adolescence, Croissance, Troubles du comportement alimentaire, Troubles des ménorrhées, Carence en fer, Carence en Vitamine D, Fractures de stress, Spécialisation sportive précoce

Keywords :

Relative energy deficiency in sport (RED-S) syndrome, Adolescence, Growth, Eating disorders, Menstrual disturbances, Iron deficiency, Vitamin D deficiency, Stress fractures, Early sport specialization

Résumé

L'adolescence est une période de la vie durant laquelle les besoins énergétiques se retrouvent accrus. C'est aussi une période de maturation sur le plan corporel et comportemental, rendant plus propice l'avènement de troubles du comportement alimentaire. Chez les jeunes sportives traversant cette période, la combinaison de ces éléments auxquels se rajoutent parfois une majoration de la quantité de pratique sportive, dans le cadre d'une spécialisation sportive précoce par exemple, peut amener à un déficit énergétique et des carences en micronutriments, le tout pouvant être à l'origine de manifestations du spectre du RED-S syndrome. On retrouve en particulier chez les adolescentes un retard de croissance parfois irréversible, une altération de la santé mentale, une atteinte de la santé osseuse, une aménorrhée et/ou des troubles hormonaux de manière générale. Afin d'éviter ces complications il importe de faire primer le côté plaisir de la pratique sportive chez ces jeunes athlètes, d'offrir un dépistage systématique du RED-S syndrome dans cette population, et dans le cas d'un

diagnostic de mettre en place une prise en charge pluridisciplinaire. La sensibilisation de l'entourage doit également être faite dans le cadre de la prévention primaire, afin d'informer ces derniers de leur impact sur l'image corporelle que se crée l'adolescente et aux comportements alimentaires adéquats chez la jeune sportive.

Summary

Adolescence represents a stage of life during which energy requirements increase substantially. It is also a period of maturation at both physical and behavioural levels, which renders individuals more susceptible to the development of eating disorders. In young female athletes, the combination of these factors, together with an often greater training load – for instance in the context of early sport specialization – may result in energy deficiency and micronutrient insufficiencies. These conditions may contribute to the emergence of clinical manifestation within the spectrum of Relative Energy Deficiency in Sport (RED-S). Among adolescent girls, this may particularly manifest as delayed growth, sometimes irreversible, impaired mental health, compromised bone health, amenorrhoea and/or broader hormonal disturbances. To prevent such complications, it is essential to emphasise the enjoyment of sport participation in this population, to implement systematic screening for RED-S, and, when diagnosis is established, to initiate appropriate multidisciplinary management. Moreover, raising awareness among the athlete's entourage is a critical component of primary prevention, aiming to inform them about the potential impact on body image development during adolescence and the importance of adequate dietary behaviours in young female athletes.

INTRODUCTION

Le syndrome « Relative Energy Deficiency in Sport » (RED-S) est un concept rapporté pour la première fois par le Comité International Olympique (CIO) en 2014 [1]. Il est une actualisation du « Female Athlete Triad » décrit en 1992 par « The American College of Sports Medicine » décrivant l'association chez les athlètes féminines d'un trouble de la fonction menstruelle avec le déficit en apport énergétique et une moindre densité osseuse [2]. Comparativement, le RED-S propose un concept plus étendu comprenant l'ensemble des troubles physiologiques observés lors d'un déficit en disponibilité énergétique (DE), résultant d'un déséquilibre entre l'apport énergétique et l'ensemble des dépenses énergétiques de l'individu regroupant le métabolisme basal, les activités quotidiennes et les dépenses lors d'activités sportives [1]. Le RED-S s'applique aux hommes comme aux femmes, la prévalence chez ces dernières est cependant supérieure à celle observée chez les hommes, allant de 23 à 79,5 % des athlètes féminines selon les études [3,4].

Dans les symptômes décrits du RED-S, en plus d'une altération de la santé osseuse et de la fonction menstruelle, on retrouve entre autres : de l'incontinence urinaire, des troubles de la santé mentale, une altération de la santé cardiovasculaire, des troubles de la croissance et du développement, des complications pouvant mener au décès [3]. Les symptômes décrits dans le cadre du RED-S résulteraient d'une adaptation métabolique à une carence énergétique par une redistribution de l'énergie disponible privilégiant certains systèmes à d'autres. Le tout fonctionnant sur un modèle de compétition

pour l'obtention des ressources, menant à un dysfonctionnement des systèmes lésés en disponibilité énergétique [5]. La quasi-totalité des systèmes du corps humain peuvent être concernés. Une altération des performances physiques/sportives peut également être observée [3,4].

La méthode de calcul de la « disponibilité énergétique », présentée par Loucks en 1991 a pour but d'évaluer l'énergie restante au corps pour assurer les fonctions physiologiques et les activités quotidiennes après le coût énergétique de l'exercice physique [6]. Elle permet d'apprécier les différents éléments qui peuvent être responsables de ce déficit : Apports énergétiques (kcal) par jour (j)–dépenses énergétiques lors d'une activité sportive

Elle s'exprime en Kcal/Kg/J. Bien que son utilisation soit débattue, son intérêt se manifeste particulièrement lors de l'installation d'un déficit énergétique, période durant laquelle on n'observe pas de diminution du coût énergétique du métabolisme basal, faussant par la suite les calculs [7]. Suivant cette dernière, le déficit peut donc provenir d'une diminution des apports avec une dépense énergétique stable comme d'une majoration de la dépense énergétique (dans le cadre d'une activité physique plus importante par exemple) sans augmentation relative des apports ou de la concomitance des deux phénomènes.

Durant l'adolescence les besoins nutritionnels sont à leur pic, notamment par l'accélération de la croissance associée à cette période [8]. Il est donc impératif que les adolescents majorent leur apport en énergie pour répondre à une demande croissante du métabolisme. L'adolescence est également une période importante sur le plan hormonal [8]. Enfin, c'est une période de fragilité mentale durant laquelle l'environnement social a une place importante sur les comportements, notamment alimentaires [9,10].

La période de l'adolescence apparaît donc comme un moment propice à l'observation d'un RED-S dans la population féminine où sa fréquence est déjà 4 fois supérieure à celle observée chez les hommes, tout âge confondu [4].

Cette revue de la littérature a pour objectif d'étudier le cas particulier des adolescentes pratiquant une activité sportive et en particulier l'interaction entre le déficit énergétique, les troubles des ménorrhées, la santé osseuse, les troubles du comportement alimentaire et les comportements à risque de retrouver ces complications chez ces dernières. Ce travail est une revue de la littérature non systématique. La recherche d'articles a été initiée via l'utilisation des mots-clés « young athlete », « mental health », « RED-S », « BMD » et « early specialisation » sur l'outil de recherche Pubmed, limitant la recherche aux méta-analyses et aux revues de la littérature publiées à partir de 2020. Les recherches ont ensuite été étendues via les sources citées dans ces publications.

RISQUE DE MOINDRE DISPONIBILITÉ ÉNERGÉTIQUE

Durant l'adolescence, les personnes acquièrent en moyenne 50 % de la masse adulte totale et entre 40 et 60 % de la masse osseuse totale [9,11]. Cela s'accompagne d'une augmentation des besoins énergétiques : l'apport énergétique recommandé quotidien d'une adolescente de 14 ans « active » est supérieur à celui d'une femme de 31 ans ou plus, il passe de 1800 kcal/j en début de puberté à 2400 kcal/j à la fin de cette dernière pour redescendre à 2200 kcal/j de 31 à 60 ans [9]. La qualité de sommeil

et les apports alimentaires adéquats durant l'adolescence sont deux facteurs essentiels à l'atteinte du pic de masse osseuse [8]. Un DE venant d'apports énergétiques en deçà de la dépense totale peut engendrer des troubles de la croissance, de la fonction gonadique et une altération des performances physiques entre autres [1]. A côté des apports énergétiques, la croissance musculaire et osseuse requiert une majoration des apports en calcium, en vitamine D et en acides aminés, d'autant plus importante s'il existe la pratique d'une activité physique [8]. Les besoins en zinc, en fer, en vitamine A, vitamine E et vitamine B sont aussi majorés [11]. Il est à noter que l'augmentation des apports nécessaires en macro- comme en micronutriments durant l'adolescence suit plutôt le stade de maturation sexuelle que l'âge, le pic de croissance étant atteint lors des stades de Tanner 2 et 3, et la fin de la croissance longitudinale survenant en moyenne un an après l'apparition des premières ménorrhées [9,11].

L'adolescence est également une période de construction de l'individu, c'est un moment d'émancipation sur le plan de l'alimentation, durant laquelle les jeunes acquièrent une plus grande autonomie sur leur bol alimentaire, pouvant engendrer des préoccupations nouvelles [9,12]. Quarante-vingt-dix pour cent des diagnostics des troubles du comportement alimentaire (TCA) se font avant 25 ans. Les ratios femmes/hommes varient selon les études, mais une prévalence plus importante chez les femmes est toujours rapportée [9,10,12–15]. L'anorexie nerveuse et la boulimie nerveuse surviennent la majorité du temps en milieu et en fin d'adolescence [9,12]. L'influence des parents, des coachs et des amis sur l'image corporelle joue un rôle important dans l'avènement de ces troubles [16–19].

Ainsi, l'adolescence apparaît d'une part comme une période à risque d'une faible disponibilité énergétique de par une majoration des apports nécessaires inhérents à la croissance, et pouvant être renforcée par une majoration de la charge d'exercices physiques et, d'autre part, parce qu'elle est une période d'importantes modifications corporelles, comme de la personnalité, pouvant mener à des comportements alimentaires inadéquats en termes d'apports.

TROUBLES DES MÉNORRHÉES

Au vu du coût énergétique important des fonctions reproductrices chez la femme (ce comprenant la grossesse et la lactation en cas de fécondation), les troubles des ménorrhées apparaissent comme l'une des premières conséquences d'un DE, et dès lors surviennent dans les premiers jours qui suivent l'installation de ce dernier [5,7,20]. Une diminution de la pulsativité de l'hormone lutéinisante (LH) est relatée après cinq jours de DE, causant ainsi une aménorrhée fonctionnelle hypothalamique (AFH). L'AFH est une aménorrhée secondaire réversible, due à une inhibition de la sécrétion pulsatile de l'hormone de libération des gonadotrophines (GnRH) par l'hypothalamus [21]. L'altération de l'axe hypothalamo-hypophyso-gonadique (HHG) apparaît d'ailleurs avant toute diminution adaptative du coût énergétique du métabolisme basal, il peut être un signal d'alerte précoce et doit être exploré à ce titre [7]. Il est intéressant de noter que la présence de réserves adipeuses ne protège pas de l'apparition d'une AFH dans le cadre d'un déficit énergétique, ce dernier élément s'expliquant certainement par l'apparition rapide du trouble hormonal [7]. C'est avant tout le DE qui serait vecteur de l'AFH et non l'augmentation de l'activité physique en tant que telle, cette causalité a notamment

été observée chez de jeunes femmes précédemment sédentaires qui débutaient une activité physique [7,22]. L'exclusivité de cette relation est cependant débattue [7].

Dans une récente méta-analyse étudiant la santé osseuse des athlètes d'endurance, une association entre aménorrhées et faible masse osseuse était présente dans 100 % des études où les aménorrhées décrites étaient des AFH [23]. Les athlètes souffrant d'une AFH vont d'ailleurs jusqu'à présenter une moindre densité osseuse que les filles sédentaires du même âge, et ce, même au niveau des régions osseuses sollicitées par la pratique sportive [24,25]. Les athlètes sans troubles de ménorrhées ont au contraire une meilleure santé osseuse et une moindre probabilité de présenter une fracture de fatigue que leurs homologues sédentaires [24]. Un déficit de l'axe HHG durant l'adolescence, pouvant provoquer une ménarche tardive, est par ailleurs associé avec un pic de masse osseuse moindre, favorisant une moindre densité osseuse à l'âge adulte et une plus grande prévalence de l'ostéoporose en post-ménopause [25–27].

L'association d'une aménorrhée/oligoménorrhée et d'une faible densité osseuse majore le risque de fracture de fatigue, ce qui n'est pas le cas d'une aménorrhée seule suggérant une survenue plus tardive de ce type de complications dans le cadre d'un DE médiée, entre autres, par la relation inhibitrice des œstrogènes sur les ostéoclastes [24,28–30].

Enfin, une étude de 2005 qui s'était penchée sur la fonction endothéliale d'athlètes d'endurance avait montré une altération de cette dernière chez les athlètes qui présentaient des aménorrhées par rapport à celles avec des cycles réguliers, l'altération étant présente de manière moindre chez les athlètes avec des oligoménorrhées [15]. À noter cependant que l'implication sur la santé cardiovasculaire de cette découverte n'avait pas été étudiée [15].

TROUBLES HORMONAUX

À côté de l'atteinte de l'axe HHG, l'apparition d'un DE impacte aussi d'autres axes endocriniens. Le DE a une action suppressive sur la sécrétion de T3, IGF-1 et de la leptine [31]. Tous trois ayant une action positive sur la croissance osseuse, le mécanisme d'action de la leptine dans ce contexte étant cependant encore méconnu, et dépendrait d'une masse adipeuse suffisante [27]. À noter qu'une diminution de la leptine pourrait avoir une action suppressive sur l'axe HHG [27]. Dans le cadre d'un DE, la sécrétion du cortisol est au contraire majorée, ce dernier ayant un rôle délétère sur la croissance, la densité osseuse et sur le développement de la masse musculaire [32]. Le stress psychique majore également sa sécrétion [32].

Comme pour les modifications de l'axe HHG, les modifications du profil endocrinien citées sont dues au DE et non à une majoration de l'activité physique sans DE associé. Une étude a notamment observé un retour à l'état hormonal normal dans les suites d'une semaine de réalimentation, comme après une compétition [27].

Maintenues au long cours durant la période de l'adolescence, elles pourraient être responsables d'un déficit de croissance, prédisposant à l'ostéoporose et avoir des conséquences délétères sur la fertilité et les périodes de gestation [27].

Les liens entre l'apparition d'un DE et ses répercussions sur le système endocrinien sont complexes et multiples, seules les plus étudiées sont détaillées ci-dessus [33].

SANTÉ OSSEUSE

La croissance osseuse durant l'adolescence se fait d'abord sur la longueur (croissance longitudinale) et se poursuit par une majoration de la densité osseuse [30]. Durant la croissance longitudinale, les os n'ont pas encore la solidité qui sera acquise par la suite et peuvent être fragilisés par des tensions provenant d'une croissance musculaire asynchrone, les rendant déjà plus vulnérables à une fracture durant cette période [30].

À l'instar des troubles de ménorrhées, une perturbation des marqueurs de formation osseuse peut être observée après seulement quelques jours de déficit énergétique, l'observation d'un impact sur la densité osseuse peut quant à lui prendre des mois, voire des années à s'installer [5]. La présence d'un indice de masse corporelle plus important protège d'ailleurs d'une diminution de la masse osseuse, les mécanismes d'apport énergétique par le tissu adipeux ayant le temps de se mettre en place, ce qui n'est pas le cas pour la fonction sexuelle [5]. Un faible indice de masse corporelle à l'inverse majore le risque d'une faible densité osseuse [34–36].

Certaines athlètes qui échouent à atteindre leur pic de masse osseuse ne sauront pas le rattraper par la suite malgré un apport énergétique adéquat [5,24,26,27]. En effet, le retour à des apports adéquats après une période prolongée de déficit en apport énergétique permet de rattraper le déficit de minéralisation osseuse, le retard de croissance sur la longueur peut, en revanche, lui ne pas l'être, empêchant l'atteinte de la taille adulte maximale possible de l'athlète [26].

Les sports d'endurance à haute intensité sont particulièrement à risque pour la santé osseuse s'ils s'accompagnent d'un DE. Une étude a observé des athlètes âgées entre 13 et 18 ans pratiquant de la course à pied en compétition, ils ont mis en évidence une faible densité osseuse pour l'âge chez plus de 50 % des participantes, 11,8 % d'entre elles étaient à -2 du Z-score [34]. Déviation d'autant plus inquiétante que chez des athlètes les déviations du Z-score ont une signification plus péjorative que dans le reste de la population, une déviation de -1 étant déjà considérée comme une densité osseuse plus basse qu'attendue [34]. Les troubles de ménorrhées, un faible indice de masse corporelle, et une longue période de participation à des compétitions (pendant plus de 5 saisons) sont associés à des déviations plus importantes du Z-score [34]. Dans les sports où la spécialisation sportive précoce est fréquente au vu des qualités physiques et esthétiques demandées, un retard de croissance peut s'observer, la diminution de la charge d'entraînement joue alors un rôle important dans le rattrapage de cette dernière [5].

Enfin, concernant les apports, une étude a objectivé une augmentation des facteurs de résorption osseuse dans le cadre d'un DE, tandis que la présence d'un déficit en glucides avec/ou sans DE était relié à une diminution des marqueurs de formation osseuse, la concomitance de ces deux éléments pouvant donc être d'autant plus péjorative pour la santé osseuse [37].

MICRONUTRIMENTS

À côté des apports énergétiques (macronutriments), l'adolescence est aussi une période où les besoins en micronutriments augmentent. Dans le cadre de cet article, nous nous contenterons d'aborder les cas particuliers du fer, de la vitamine D et du calcium. Ces derniers ayant un rapport particulièrement étroit avec la pratique d'une activité sportive et la croissance. Les adolescentes ont des besoins en fer majorés de par l'augmentation de la production d'hémoglobine, de la masse musculaire, et l'apparition de pertes menstruelles [9,38]. Pour exemple, les besoins en fer qui sont quasiment doublés par rapport à la période de « pré-adolescence » [39]. Dans la pratique du sport de haut niveau, on retrouve des phénomènes inflammatoires (majoration de l'hépcidine), des pertes digestives, des lésions intravasculaires induites par l'effort, de l'hémolyse, de l'hématurie, et accessoirement par la transpiration majorant les besoins en fer par rapport à la population générale [38]. Cela est particulièrement vrai dans la course à pied où l'on assiste à une hémolyse intravasculaire de par les chocs répétés sur la voûte plantaire, la durée de vie moyenne des globules rouges chez les athlètes d'endurance étant de seulement 40 % de celle observée chez les personnes sédentaires, le déficit en fer pouvant mener à une altération des capacités d'endurance [38]. Selon les études, on observe un déficit en fer chez plus de 50 % des athlètes féminines adolescentes, des valeurs montant jusqu'à 89 % sont relatées [39,40].

Les besoins en vitamine D et en calcium sont également majorés durant l'adolescence, des apports adéquats sont importants pour optimiser la valeur du pic de masse osseuse [41–44]. À l'inverse, un déficit en calcium majore le risque de fractures de fatigue, de même qu'un déficit en vitamine D joue un rôle délétère sur la croissance osseuse et la protection contre les fractures [16,41]. La vitamine D, en plus de son rôle dans la formation osseuse, apparaît également importante pour la fonction musculaire, une carence expose à des risques accrus de crampes et de blessures musculaires, notamment par la création d'une hypersensibilité musculaire [41,43–45]. À l'inverse, des apports suffisants de vitamine D favorisent la croissance et la réparation des fibres musculaires et amélioreraient les performances physiques [45]. Les athlètes pratiquant un sport d'endurance de par la durée de leurs entraînements et le maintien d'un effort à une puissance sous maximale ont plus de risque de présenter un déficit calcique [42].

ACTIVITÉ SPORTIVE, SANTÉ MENTALE, ET TROUBLES DU COMPORTEMENT ALIMENTAIRE

Des données contradictoires sont retrouvées concernant une prévalence plus élevée de troubles du comportement alimentaire (TCA) chez les adolescentes pratiquant un sport de manière compétitive que chez les non-athlètes et/ou pratiquantes récréatives [17,46–48]. Les chiffres de la prévalence des TCA varient entre 0 et 54 % chez les adolescentes sportives selon les études [24].

Dans les sports où le poids du corps et/ou l'apparence corporelle ont un rôle important comme la danse, la gymnastique et les sports d'endurance, on rencontre par contre une prévalence plus élevée de TCA que chez leurs homologues sédentaires ou pratiquant d'autres sports, particulièrement dans

le cadre d'un entraînement intensif [17,19,46]. Le risque de comportements restrictifs alimentaires est particulièrement concerné dans ces sports, la recherche de minceur et la sensation de perte de contrôle du comportement alimentaire en étant à l'origine [16,17]. La pression subie par l'entourage des athlètes dans l'avènement de ces phénomènes joue un rôle particulièrement important dans les sports d'endurance, d'autant plus chez les jeunes filles chez qui l'image corporelle joue un rôle plus important sur le souhait de contrôle du poids que chez les garçons du même âge [16–19,46]. Une étude a observé, par le biais de questionnaire réalisé à un an d'intervalle chez des adolescentes pratiquant un sport avec une forte composante « esthétique », que les athlètes les plus à risque de développer un TCA sont celles qui se focalisent sur leur poids et considèrent ce dernier comme l'élément cardinal pour performer [19]. Donnée inquiétante au vu d'une fréquence rapportée de remarques négatives de leur coach sur leur aspect physique plus important chez les pratiquants de ces sports (endurance, natation synchronisée, saut à ski, cyclisme...) [49]. Dans ce contexte, une faible estime de soi et une personnalité anxieuse sont deux facteurs de vulnérabilité supplémentaires [46]. Il est intéressant de constater que ces traits de caractère sont retrouvés plus fréquemment chez les adolescentes souffrant d'AFP associés à une plus grande prévalence de la dépression, des troubles de l'anxiété, et de préoccupations de leur image corporelle, le tout amenant à l'adoption de comportements alimentaires restrictifs [50]. Dans les différents TCA, l'anorexie nerveuse est particulièrement reliée au RED-S au vu des complications qui lui sont inhérentes : aménorrhée, diminution de la masse osseuse, retard de croissance [9,51].

Dans la boulimie nerveuse, des phases d'exercice physique intense dans la visée de compenser une prise alimentaire sont fréquentes, pouvant également mener à un DE [9].

La relation entre troubles psychiques et DE est réciproque puisque ce dernier peut être vecteur de dépression, comme observé dans une étude portant sur 1200 athlètes pratiquant au minimum 4 heures de sport par semaine, dans laquelle on remarque que les athlètes avec un faible apport énergétique ont 2 fois plus de risque de présenter des symptômes d'une dépression. L'apparition de cette dernière étant déjà favorisée par la présence d'un TCA peut dès lors mener à une dynamique dangereuse [51,52].

Enfin, en dehors de comportements alimentaires restrictifs volontaires, il importe de préciser que la faim n'est pas un signal suffisant pour réguler ses apports énergétiques dans le cadre d'une majoration de son activité sportive [31]. Elle ne s'accompagne pas en réalité d'une régulation des signaux de faim permettant les apports quotidiens adéquats, de plus une majoration de la satiété est observée dans les suites d'un effort physique [53,54]. Le DE peut donc advenir en dehors d'une démarche volontaire et avoir une répercussion secondaire sur la santé mentale par le biais des phénomènes exposés ci-dessus. Ce cercle vicieux est alimenté aussi par l'action délétère sur la qualité de sommeil d'une pratique physique intense, facteur favorisant au développement de troubles de la santé mentale [3,55].

Enfin, les répercussions à court terme du DE sur le quotidien du jeune sportif : perte de poids, amélioration transitoire des performances et possibles retours positifs de l'entourage sur l'allure physique sont à risque de favoriser la poursuite de comportements alimentaires restrictifs et la pratique d'exercices physiques plus intense [49].

Notons, que si de nombreuses études ont étudié la causalité entre la pratique de certains sports et l'émergence de TCA, le lien entre les TCA, la dépendance à l'exercice physique et le développement d'un RED-S syndrome n'est pas encore bien étudié [3,49].

LES SPORTS À RISQUE

Il importe ici de discuter des pratiques et comportements sportifs qui maximisent le risque d'un DE.

La spécialisation sportive précoce se caractérise par « un entraînement intensif toute l'année à l'instar d'autres sports » chez des enfants prépubères [56]. De par ses caractéristiques, elle majore le risque de DE. La spécialisation sportive précoce favorise entre autres les situations de burnout et les fractures de fatigue. Dans ce contexte, elle peut être responsable d'arrêt temporaire, voire définitif du sportif [56–59]. C'est un facteur de risque à part entière de la « female triad », au même titre que des abus sexuels ou un dysfonctionnement familial, soulignons que le risque de complications liées à la spécialisation sportive précoce est dépendant du volume d'entraînement associé à cette dernière [24,27,56].

La spécialisation sportive précoce est particulièrement fréquente dans les sports d'endurance et dans la gymnastique [57,59]. Dans les premiers, on retrouve plutôt une problématique de faible densité osseuse associée à la présence de chocs répétés à moindre intensité sur des régions osseuses ciblées et invariables [27,30,57,60]. Une prévalence allant jusqu'à 10 % de fractures de fatigue est observée chez les athlètes d'endurance et 22 % chez les athlètes pratiquant de la course sur piste [30]. On observe aussi chez ces athlètes une prévalence plus élevée d'aménorrhée que dans la population générale [2,61–63]. L'augmentation de la charge d'entraînement, si elle s'accompagne d'un apport énergétique adéquat, ne favorise pas ces fractures [20,64].

Chez les pratiquantes de gymnastique, on retrouvera plutôt une problématique de retard de croissance, parfois définitive [26]. La présence de chocs à haute intensité dans ces sports joue un rôle positif sur la densité osseuse qui peut être contrebalancée négativement par une charge d'entraînement importante, une valeur seuil de 15 heures d'entraînement/semaine étant considérée [5,27,31,60]. Remarquons que ce déficit de croissance est particulièrement retrouvé dans la gymnastique artistique, les pratiquantes de gymnastique rythmique apparaissant plus épargnées [27].

Dans les autres sports avec des impacts de haute intensité, comme le judo, ceux comprenant des sauts ou dans les sports avec des impacts irréguliers comme le football, les effets négatifs d'un DE et des troubles de ménorrhées sur la croissance osseuse sont partiellement compensés par les actions de la pratique sportive sur la densité osseuse, expliquant que la problématique des fractures de fatigue sont moins fréquentes dans ce type de sport, les pratiquants ont d'ailleurs en moyenne un pic de masse osseuse supérieur à leurs homologues sédentaires, cette compensation ne dépassant pas les limites d'une charge d'entraînement trop importante [27,60]. Il est bien sûr à noter que la pratique sportive sans DE a des effets bénéfiques sur la masse osseuse [60].

À l'inverse, les pratiquantes de sports sans impact (natation, natation synchronisée, waterpolo, cyclisme...), ne voient pas d'amélioration de leur densité osseuse par rapport à leurs homologues sédentaires [60,65]. Une méta-analyse observe une diminution de l'épaisseur de la corticale osseuse

de la diaphyse tibiale des pratiquants de natation [65]. Toutefois, la présence d'effets négatifs au long cours sur la santé osseuse engendrée par une pratique de la natation durant l'enfance est très controversée, certaines études montrant à l'inverse des effets positifs [66].

Concernant la pratique du cyclisme, plusieurs études ont mis en évidence une plus faible densité osseuse des pratiquants par rapport à une population contrôle [67]. Cette corrélation est d'autant plus démontrée chez les pratiquants dont la charge d'entraînement est importante, les professionnels entre autres [67]. Une étude transversale portant sur des cyclistes engagés dans des équipes professionnelles ou dans des programmes pour jeunes talents a observé une prévalence élevée d'une faible densité minérale osseuse (DMO) dans la population étudiée, particulièrement dans le groupe des jeunes cyclistes féminines où cette dernière avoisine les 40 % [68]. Dans cette même étude, une faible DMO était associée avec un épisode de fracture passé [68].

L'association de ces observations et du fait de la dépense énergétique importante associée à ces deux disciplines posent la question des risques pour la santé osseuse de la spécialisation sportive précoce des pratiquants [65].

Notons que la discussion porte ici sur les potentiels effets négatifs de la pratique de ces sports sur la santé osseuse et que ces derniers sont particulièrement observés dans le cadre d'une pratique intense, il convient de ne pas associer leur pratique à intensité modérée avec un effet négatif sur la santé globale.

Enfin, il est nécessaire de porter un regard sur les pertes pondérales rapides, principalement pratiquées dans les sports de combat avec catégories de poids. Ces pratiques se font généralement sur seulement quelques jours et peuvent avoir un retentissement physiologique, on retrouve notamment des troubles hormonaux, une diminution du métabolisme basal, un déficit de la formation osseuse, des fractures de fatigue et un ralentissement de la croissance [69]. Les périodes de repos et une réalimentation permettent de diminuer le risque de survenue de ces complications, à l'inverse de longues périodes de compétition sans temps de repos et le souhait de maintien d'un poids de forme correspondant à une catégorie sont à risque d'impacts négatifs sur la croissance [69,70].

Les pertes pondérales rapides exposent également à des complications moindres mais immédiates : maux de tête, nausées, faiblesse musculaire, tachycardie et état fébrile entre autres [70,71]. La présence d'une irritabilité et de troubles de la concentration sont aussi fréquentes, une neuroglycopénie associée pourrait expliquer ces symptômes [72]. La réhydratation, la réalimentation et le repos suffisent à leur estompement [69,73]. Mentionnons qu'une perte pondérale rapide chez des sujets sans surpoids préalable pourrait également avoir des répercussions sur leur santé cardiovasculaire [71]. De même, la majoration de la fréquence cardiaque liée à un état de déshydratation diminue les capacités de récupération et favorise une instabilité cardiovasculaire [73].

Ces pratiques sont loin d'être réservées à des situations isolées chez les pratiquants de sport de combat, une revue de la littérature s'intéressant aux jeunes athlètes de moins de 19 ans pratiquant du judo, de la boxe ou de la lutte a mis en évidence une prévalence variant de 25 à 80 % de la réalisation d'une perte pondérale rapide chez ces derniers, à noter que la population étudiée apparaît plus masculine [70]. L'« American Academy of Pediatrics » déconseille toute intervention à visée de perte de poids pouvant avoir un effet secondaire sur la santé chez le jeune sportif, l'« American College of

Sports Medicine » demande l'absence d'interventions visant à modifier le poids chez les athlètes mineurs [74]. Le « National Collegiate Athletic Association » discute d'une perte de poids de maximum 1,5 % du poids total/semaine et le maintien d'une masse grasseuse correspondant à au moins 5 % du poids total, ces recommandations s'appliquant plutôt à des athlètes d'au moins 18 ans et datent de 1997 [74]. La « National Federation of State High School Associations » préconise également une perte de poids maximum de 1,5 % du poids total/semaine, elle demande, en revanche, le maintien de 12 % du poids corps total en masse grasseuse chez les filles, 7 % chez les garçons, ces chiffres étant plus adaptés à un public plus jeune [75]. Le CIO déconseille l'étude de la composition corporelle et des interventions sur cette dernière chez les athlètes de moins de 18 ans [3]. Nous n'avons pas réussi à trouver de recommandations européennes en la matière sur le public ciblé.

En résumé, trois catégories de sport apparaissent particulièrement à risque de développer des symptômes rentrant dans le cadre d'un RED-S :

- les sports où l'esthétique corporelle est cruciale (la gymnastique artistique, la danse, la natation synchronisée...);
- les sports dans lesquels un poids léger est un avantage (la course à pied, le cyclisme...), la pratique d'une spécialisation sportive précoce étant plus fréquente dans ces catégories, et enfin ;
- les sports catégorisés par poids de corps et/ou un poids de forme doit être atteint, comme les sports de combat (le judo, le taekwondo, la boxe, la lutte...).

FONCTION MUSCULAIRE ET PERFORMANCES PHYSIQUES

Chez un public dont la majoration du DE peut découler d'une majoration de la charge d'entraînement, et ce, à visée de résultats sportifs, il importe de rappeler qu'une altération des performances physiques peut être observée dans le cadre d'un RED-S syndrome [3]. Chez un sujet sain, la pratique d'une activité physique permet d'améliorer l'endurance et la force [76]. À l'image du détournement des effets positifs de l'activité physique sur la santé osseuse, un DE peut être à l'origine d'une atteinte de la fonction musculaire, la carence en protéines et en glucides associées étant une partie de l'explication [3,76].

Les protéines, tout d'abord, ont un rôle majeur dans la construction de la masse musculaire et la réparation des lésions de cette dernière provoquées entre autres par l'entraînement, une diminution de l'apport protéique empêche une récupération musculaire adéquate [76].

Un apport glucidique faible amène, quant à lui, à une déplétion des réserves en glycogène musculaire, responsable d'une plus grande dégradation musculaire durant l'effort et d'une moindre synthèse musculaire après l'effort, ces effets s'observent en quelques jours seulement de déplétion [77]. De faibles réserves en glycogène musculaire entraînent une fatigue musculaire sur les efforts d'endurance comme sur ceux de haute intensité, des troubles du sommeil pouvant se surajouter dans le cadre d'une pratique sportive importante, majorant la fatigue [8,55,76,78].

Dans les autres répercussions négatives d'un DE sur les performances physiques que l'on peut observer, on note : une augmentation des absences à l'entraînement dues à une prévalence majorée des blessures ou des maladies, une altération de la récupération musculaire, une altération de la force ou de l'endurance musculaire, et une diminution de la motivation déclarée [3]. La probabilité de survenue de ces complications est majorée dans le cadre d'une spécialisation sportive précoce, menant à l'inverse des résultats escomptés [57].

DISCUSSION

Au regard des sujets abordés, l'adolescence apparaît comme une période propice à l'apparition d'un DE et durant laquelle ce dernier peut avoir des répercussions particulièrement importantes. Dans les facteurs de risque, on retrouve tout d'abord la majoration des besoins suivant la croissance associée à cette période, et ce, dès les premiers stades de maturation sexuelle. Ensuite, la pression sociale perçue par l'entourage immédiat et le coach, entre autres, a un potentiel d'impact important, pouvant amener à des comportements alimentaires restrictifs découlant d'une focalisation sur l'allure physique et le poids corporel. Enfin, elle peut être une période de majoration de la charge d'entraînement, notamment dans le cadre d'une spécialisation sportive précoce. Certains sports, comme la course à pied ou la gymnastique, favorisent la présence de ces différents éléments et sont donc plus à risque d'amener à un DE, et potentiellement un RED-S syndrome, dont les conséquences sur la croissance peuvent être irréversibles. Dans ce contexte, il importe d'agir en prévention de l'installation d'un DE. Les interventions devaient être adaptées au public ciblé (âge, genre, niveau socio-culturel, niveau sportif, sport pratiqué...) [79].

L'adolescence est la période critique durant laquelle une personne acquiert des habitudes alimentaires qui l'accompagneront durant sa vie d'adulte. L'association entre poids, aspect physique et performance sportive pouvant être délétère surtout s'il existe une fragilité psychologique préalable, il importe donc de déconstruire les éventuelles perceptions négatives durant cette dernière, cela passant notamment par la diffusion d'informations sur les modifications qu'ils observent à cette période dans leur corps et leur comportement [3,46,79]. L'éducation et l'éveil des jeunes sportives, ainsi que leur entourage, aux pratiques nutritionnelles adéquates associées à la pratique sportive est également un élément important, le niveau de connaissance des différents protagonistes dans ce domaine apparaissant comme faible [3]. Un avertissement doit aussi être réalisé sur le rôle primordial que la santé doit prendre dans le sport sur la performance, une charge d'entraînement élevée étant de plus pourvoyeuse de blessures et d'arrêt de la pratique par le sportif [3,57–59].

Enfin, des actions plus spécifiques peuvent être entreprises dans les sports de combat par exemple, il pourrait être opportun de réaliser des catégories basées sur la taille plutôt que sur le poids [70]. Le CIO déconseille l'étude de la composition corporelle et des interventions sur cette dernière chez les athlètes de moins de 18 ans, au vu des pressions psychologiques, de la perception corporelle et donc des comportements alimentaires qui peuvent en découler [3,79]. Si, toutefois une modification de la composition ou de la masse corporelle de la jeune sportive est envisagée, cette dernière doit se faire de manière encadrée et dans des objectifs réalistes [3,79].

Toujours dans la prévention primaire, un consensus d'organisations sportives porte sur les risques liés à une SSP et indique l'intérêt d'une diversification sportive précoce au profit d'une spécialisation sportive tardive, la charge d'entraînement et les risques inhérents à la spécialisation sportive précoce étant développés ci-dessus [59].

Concernant le dépistage, il convient de rappeler que le RED-S syndrome est un diagnostic d'exclusion, la recherche d'autres étiologies tels qu'un syndrome de malabsorption, une pathologie neuro-endocrine, une étiologie médicamenteuse..., doit être préalable à son diagnostic [79]. De plus, son investigation est compliquée par le fait qu'il est difficile d'établir une estimation fiable des apports et dépenses énergétiques et donc de mettre un éventuel DE en évidence [3]. Il importe de réaliser un dépistage systématique et de ne pas se fier à l'aspect physique, un indice de masse corporelle élevé n'étant pas un facteur permettant d'exclure un diagnostic de RED-S [46,52]. Pour se faire, le CIO propose le « RED-S CAT2 scoring tool », une méthode de dépistage organisée en trois étapes afin de permettre un dépistage du plus grand nombre avec un coût minime. La première consiste en la réalisation de questionnaires et/ou d'anamnèse adaptée à la population ciblée afin de détecter les pratiquants à risque, sont évalués entre autres : la présence de symptômes tels que des aménorrhées ou une perte de fonction érectile, des épisodes grippaux à répétition, des symptômes dépressifs ou encore une focalisation sur l'apparence physique [3,79]. L'utilisation de questionnaires de dépistage de TCA est également recommandée [79]. Les investigations sont ensuite poursuivies chez tous les interrogés qui présentent plus qu'un faible risque au terme de la première étape. Sont alors évalués la présence de facteurs de sévérité et de diagnostic du RED-S, requérant entre autres la réalisation d'examens sanguins (dosage de la T3 et de l'IGF-1 notamment) et l'évaluation de la masse osseuse. Suite aux informations recueillies durant les deux premières étapes, les sportifs sont classés en niveau de sévérité allant du vert (pas de risque ou risque très bas) à rouge (risque très haut ou risque extrême). La troisième étape consiste en la réalisation du diagnostic de RED-S syndrome par un médecin. Ce dernier prévoit ensuite la prise en charge thérapeutique adéquate : la gestion des manifestations du RED-S syndrome se faisant par le biais d'une équipe pluridisciplinaire formée de médecins sportifs, de psychologues, de diététiciens, d'endocrinologues, de gynécologues selon les symptômes, et d'entraîneurs, une intégration des coaches dans l'équipe peut également s'avérer utile [3,79–81].

Le premier traitement reste le retour à des apports énergétiques adéquats, demandant parfois la diminution de la charge sportive si la majoration de l'apport énergétique seul n'est pas suffisante [3]. Pour la charge d'entraînement, une règle simple chez les adolescents est de ne pas dépasser l'âge en années et en nombre d'heures d'entraînement/semaine [57]. Une étude a montré le retour de ménorrhées chez des athlètes souffrant d'AFP avec une supplémentation énergétique de 360 kcal/jour, à noter que plus l'aménorrhée était présente depuis longtemps, plus le retour de menstruations était tardif [82]. Le rattrapage d'une masse osseuse dans les normes est dépendante du retour préalable d'une fonction gonadique normale, son retour aux valeurs souhaitées demande donc plus de temps que le retour de ménorrhées régulières à l'image de son installation [48,82,83]. Une latence trop importante du retour de la densité osseuse peut être le témoin d'un apport énergétique insuffisant [83]. Concernant les traitements pharmacologiques, ceux-ci ne sont à considérer qu'en complément d'un apport énergétique adéquat et ne doivent pas être envisagés de manière systématique [3,48]. En ce qui concerne les déficits ferriques, la prise en charge par une modification de l'alimentation est la première action à mettre en place, une supplémentation en fer ferreux est à

envisager quand ils se traduisent par de l'anémie ferriprive. En prévention primaire, une supplémentation n'est pas recommandée chez l'adolescent [16,38,39]. La valeur seuil de 30 microgrammes/litre peut être utilisée comme témoin d'un déficit en fer au-delà de 15 ans, pour les adolescents entre 12 et 15 ans, on utilisera 20 mcg/L [39,40]. Au sujet de la vitamine D, les apports quotidiens recommandés varient d'un pays à l'autre et vont de 600 à 1000 UI/jour. Si la supplémentation systématique ne présente pas des effets bénéfiques démontrés, la supplémentation en cas de carence est recommandée, à noter que les athlètes qui pratiquent un sport en intérieur sont une population à risque [16,44]. Pour le calcium, les besoins sont supérieurs chez l'adolescent avec une activité sportive que chez l'adolescent sédentaire, il n'existe cependant pas de recommandations spécifiques pour ce public cible, les apports préconisés sont variables et vont de 800 à 1300 milligrammes/ jour selon les sources, en cas de déficit il convient de s'assurer d'un apport suffisant par l'alimentation avant d'envisager toute supplémentation [41,43]. Cette recommandation apparaît d'autant plus importante que, à l'heure actuelle, les modifications d'habitudes alimentaires observées chez les adolescents favorisent les déficits en calcium [84].

Concernant la prise en charge de l'aménorrhée, l'instauration d'une pilule oestro-progestative sans majoration des apports énergétiques risque de donner une sensation de retour à la normalité sans pour autant offrir une protection sur la densité osseuse [57]. Dans la même idée, l'utilisation des bisphosphonates chez les adolescentes dans le cadre d'une faible densité osseuse n'est pas recommandée, les problèmes de densité osseuse provenant plutôt d'un manque de formation que d'un surplus de résorption [24]. Une étude a montré des résultats supérieurs sur la majoration de la densité osseuse de l'association thérapeutique, sur 12 mois d'un patch de 17beta-oestradiol et d'une contraception orale par micro-progestérone, par rapport à l'utilisation d'une pilule oestro-progestative chez des athlètes entre 14 et 25 ans eutrophiques présentant une aménorrhée, les deux groupes bénéficiant d'apports adéquats en vitamine D et en calcium [80]. En complément d'un apport énergétique suffisant, la réalisation d'exercices avec impact modéré et sévère en plus des entraînements chez les pratiquants de sport avec des chocs répétés de faible intensité (course à pied, natation, waterpolo, cyclisme...) pourrait être une piste pour contrecarrer les effets délétères sur la densité osseuse du DE rencontrés dans ces sports [23].

Enfin, au sujet de la prise en charge et de diagnostics des troubles de la santé mentale, cette dernière reste particulièrement compliquée dans un contexte de peur de stigmatisation de la part du sportif, le rôle de l'entourage et du coach en particulier, est décisive dans l'attitude que le sportif va porter devant ce type de problème [85]. Si les filles ont moins de craintes de stigmatisation que les hommes à discuter de l'apparition d'un trouble de la santé mentale, leur participation à des sports anciennement considérés comme « masculin » peut être responsable d'une marginalisation et d'une désapprobation par leur milieu culturel, facteur hautement délétère pour leur santé mentale [85]. Une psychothérapie est nécessaire en cas de mise en évidence d'une TCA, elle peut être réalisée de manière simultanée à une rééducation alimentaire [79]. La reprise de poids est un élément à part entière du traitement, une corrélation a été observée entre cette dernière et une diminution des symptômes d'anxiété et de dépression [79]. Toute pathologie mentale concomitante au RED-S doit être considérée comme une priorité à la prise en charge, le lien entre les deux est en effet réciproque, chacune pouvant être cause ou conséquence de l'autre [49,79,86]. En dehors des TCA et des troubles du sommeil, la prise en charge des troubles de la santé mentale nécessite généralement d'avoir recours à une pharmacothérapie [79].

La thérapie familiale peut être un outil efficace également, son intérêt sur la problématique étant à évaluer au cas par cas [85]. À noter que si l'intérêt de la thérapie cognitivo-comportementale est reconnue au niveau de la population générale, ses bénéfices restent peu étudiés chez le sportif [85]. Enfin, au vu du risque suicidaire associé à ce spectre de pathologies et en particulier à l'anorexie nerveuse, la présence d'une TCA nécessite la réalisation d'une évaluation du risque suicidaire [79]. Au même titre qu'un suivi des fonctions physiologiques doit être organisé, un suivi de paramètres tels que l'estime de soi, la perception de son corps, les inquiétudes centrées sur l'alimentation, est nécessaire dans la prise en charge du RED-S [49].

CONCLUSION

L'adolescence est une période à risque du développement d'un RED-S syndrome. Il apparaît important de faire primer l'aspect santé du sport avant le côté compétition pour le bien de la sportive au court comme au long terme. Cette attention est d'autant plus importante qu'elle est portée dans une période de croissance où le manque des apports nécessaires peut mener à des complications irréversibles. Une majoration des apports alimentaires devant s'observer devant une augmentation de la charge d'entraînement, cette dernière devant par ailleurs se faire de manière progressive. L'encadrement par les professionnels du milieu et la dispense d'informations sur les apports adéquats aux athlètes favorisent des comportements sains.

Certains sports de par leurs caractéristiques rendent leurs pratiquantes plus à risque de développer un RED-S syndrome, il convient de renforcer la prévention primaire particulièrement dans ceux-ci. Par ailleurs, un trouble de ménorrhées ne devant pas être perçu comme une adaptation « normale » à la pratique sportive.

Enfin, il importe de s'intéresser à la santé mentale des jeunes sportives tout autant qu'à leur santé physique, un trouble de la santé mentale pouvant mener par des mécanismes complexes et divers à un DE, tout comme il peut être un témoin de la présence de ce dernier. L'entourage jouant un rôle particulièrement important dans l'image corporelle que se crée une adolescente d'elle-même, il est important de la considérer comme un élément à part entière de la problématique et de proposer à l'adolescente une éducation aux bonnes pratiques alimentaires et aux risques de la focalisation sur l'atteinte d'objectifs corporels et/ou de poids pour performer.

DÉCLARATION DES LIENS D'INTÉRÊTS

Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

Les auteurs n'entretiennent aucune relation financière, personnelle ou professionnelle susceptible d'influencer la recherche présentée dans ce manuscrit.

RÉFÉRENCES

- [1] Mountjoy M, Sundgot-Borgen J, Burke L, 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.
- [2] Yeager KK, Agostini R, Nattiv A, et al. The female athlete triad: disordered eating, amenorrhea, osteoporosis. *Med Sci Sports Exerc* 1993;25:775–7.
- [3] Mountjoy M, Ackerman KE, Bailey DM, et al. 2023 IOC consensus statement on relative energy deficiency in sport (REDs). *Br J Sports Med* 2023;57(17):1073–98.
- [4] CHUV. Le syndrome du RED-S chez les jeunes sportifs. Lausanne; 2025.
- [5] Shirley MK, Longman DP, Elliott-Sale KJ, et al. A life history perspective on athletes with low energy availability. *Sports Med* 2022;52(6):1223–34.
- [6] Loucks AB, Verdun M, Heath EM. Low energy availability, not stress of exercise, alters LH pulsatility in exercising women. *J Appl Physiol* (1985) 1991;71(2):802–10.
- [7] Lieberman JL, Souza DEMJ, Wagstaff DA, Williams NI. Menstrual disruption with exercise is not linked to an energy availability threshold. *Med Sci Sports Exerc* 2018;50(3):551–61.
- [8] Das JK, Salam RA, Thornburg KL, et al. Nutrition in adolescents: physiology, metabolism, and nutritional needs. *Ann N Y Acad Sci* 2017;1393:21–33.
- [9] Corkins MR, Daniels SR, de Ferranti SD, Golden NH, Kim JH, Magge SN, et al. Nutrition in children and adolescents. *Med Clin North Am* 2016;100(6):1217–35.
- [10] Chew KK, Temples HS. Adolescent eating disorders: early identification and management in primary care. *J Pediatr Health Care* 2022;36(6):618–27.
- [11] World Health Organization. Guideline: implementing effective actions for improving adolescent nutrition. Geneva: World Health Organization; 2018.
- [12] ANAE. Référentiel psychiatrie-addictologie; 2021.
- [13] Alhaj OA, Fekih-Romdhane F, Sweidan DH, Saif Z, Khudhair MF, Ghazzawi H, et al. The prevalence and risk factors of screen-based disordered eating among university students: a global systematic review, meta-analysis, and meta-regression. *Eat Weight Disord* 2022;27(8):3215–43.
- [14] Solmi M, Radua J, Olivola M, Croce E, Soardo L, Salazar de Pablo G, et al. Age at onset of mental disorders worldwide: largescale meta-analysis of 192 epidemiological studies. *Mol Psychiatry* 2022;27(1):281–95.
- [15] Rickenlund A, Eriksson MJ, Schenck-Gustafsson K, Hirschberg AL. Amenorrhea in female athletes and endothelial dysfunction. *J Clin Endocrinol Metab* 2005;90(3):1354–9.
- [16] Capra ME, Stanyevic B, Giudice A, Monopoli D, Decarolis NM, Esposito S, et al. Nutrition for children and adolescents who practice sport: a narrative review. *Nutrients* 2024;16:2803.
- [17] Chapa DA, Johnson SN, Richson BN, Bjorlie K, Won YQ, Nelson SV, et al. Eating-disorder psychopathology in female athletes and non-athletes: a meta-analysis. *Int J Eat Disord* 2022;55(7):861–85.
- [18] Helfert S, Warschburger P. A prospective study on the impact of peer and parental pressure on body dissatisfaction in adolescent girls and boys. *Body Image* 2011;8(2):101–9.
- [19] Krentz EM, Warschburger P. A longitudinal investigation of sports-related risk factors for disordered eating in aesthetic sports. *Scand J Med Sci Sports* 2013;23(3):303–10.
- [20] Loucks AB, Verdun M, Heath EM. Low energy availability, not stress of exercise, alters LH pulsatility in exercising women. *J Appl Physiol* 1998;84(1):37–46. Crossref. PubMed. Web of Science.
- [21] Loucks AB, Thuma JR. Luteinizing hormone pulsatility is disrupted at a threshold of energy availability in regularly menstruating women. *J Clin Endocrinol Metab* 2003;88(1):297–311.
- [22] Loucks AB, Verdun M, Heath EM. Low energy availability, not stress of exercise, alters LH pulsatility in exercising women. *J Appl Physiol* 1998;84(1):37–46 [With the Technical Assistance of T. Law Sr. and J. R. Thuma].
- [23] Hutson MJ, O'Donnell E, Brooke-Wavell K, Sale C, Blagrove RC. Effects of low energy availability on bone health in endurance athletes and high-impact exercise as a potential countermeasure: a narrative review. *Sports Med* 2021;51(3):391–403.
- [24] Weiss Kelly AK, Hecht S, Council on sports medicine and fitness, Brenner JS, LaBella CR, Brooks MA, Diamond A, et al. The female athlete triad. *Pediatrics* 2016;138(2) [e20160922].
- [25] Ackerman KE, Putman M, Guereca G, et al. Cortical microstructure and estimated bone strength in young athletes. *Bone* 2012;51(4):680–7.

- [26] Ducher G, Turner AI, Kukuljan S, et al. Obstacles in the optimization of bone health outcomes in the female athlete triad. *Sports Med* 2011;41(7):587–607.
- [27] Maïmoun L, Georgopoulos NA, Sultan C. Endocrine disorders in adolescent and young female athletes. *J Clin Endocrinol Metab* 2014;99(11):4037–50.
- [28] Barrack MT, Gibbs JC, De Souza MJ, Williams NI, Nichols JF, Rauh MJ, et al. Higher incidence of bone stress injuries with increasing female athlete triad-related risk factors: a prospective multisite study of exercising girls and women. *Am J Sports Med* 2014;42(4):949–58.
- [29] Horn E, Gergen N, McGarry KA. The female athlete triad. *Rhode Island Med J* 2014;97(11):18.
- [30] Ackerman KE, Cano Sokoloff N, Nardo Maffazioli DE, Clarke G, Lee HM, Misra HM. Fractures in relation to menstrual status and bone parameters in young athletes. *Med Sci Sports Exerc* 2015;47(8):1577–86.
- [31] Loucks AB. Energy balance and body composition in sports and exercise. *J Sports Sci* 2004;22(1):1–14.
- [32] Mousikou M, Kyriakou A, Skordis N. Stress and growth in children and adolescents. *Horm Res Paediatr* 2023;96(1):25–33.
- [33] Morrison AE, Fleming S, Levy MJ. A review of the pathophysiology of functional hypothalamic amenorrhoea in women subject to psychological stress, disordered eating, excessive exercise or a combination of these factors. *Clin Endocrinol (Oxf)* 2021;95(2):229–38.
- [34] Barrack MT, Rauh MJ, Nichols JF. Prevalence of and traits associated with low bone mineral density among female adolescent runners. *Med Sci Sports Exerc* 2008;40(12):2015–21.
- [35] Barrack MT, Van Loan MD, Rauh M, Nichols JF. Disordered eating, development of menstrual irregularity, and reduced bone mass change after a 3-year follow-up in female adolescent endurance runners. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 2021;31(4):337–44.
- [36] Barrack MT, Van Loan MD, Rauh MJ, Nichols JF. Physiologic and behavioral indicators of energy deficiency in female adolescent runners with elevated bone turnover. *Am J Clin Nutr* 2010;92(3):652–9.
- [37] Fensham NC, Heikura IA, McKay AK, et al. Short-term carbohydrate restriction impairs bone formation. *J Bone Miner Res* 2022;37(10):1915–25.
- [38] Damian M-T, Vulturar R, Login CC, Damian L, Chis A, Bojan A. Anemia in sports: a narrative review. *Life* 2021;11(9):987.
- [39] Clénin G, Cordes M, Huber A, Schumacher YO, Noack P, Scales J, et al. Iron deficiency in sports-definition, influence on performance and therapy. *Swiss Med Wkly* 2015;145:w14196.
- [40] Malczewska-Lenczowska J, Orysiak J, Szczepańska B, Turowski D, Burkhard-Jagodzińska K, Gajewski J. Reticulocyte and erythrocyte hypochromia markers in detection of iron deficiency in adolescent female athletes. *Biol Sport* 2017;34(2):111–8.
- [41] Llorente-Cantarero FJ, Palomino-Fernández L, Gil-Campos M. Nutrition for the young athlete. *J Child Sci* 2018;8:e90–8.
- [42] Petrie HJ, Stover EA, Horswill CA. Nutritional concerns for the child and adolescent competitor. *Nutrition* 2004;20(7–8):620–31.
- [43] Desbrow B. Youth athlete development nutrition. *Sports Med* 2021;51(Suppl 1):3–12.
- [44] Patseadou M, Haller DM. Vitamine D chez les adolescents. *Rev Med Suisse* 2020;16:778–83.
- [45] de la Puente Yagüe M, Collado Yurrita L, Ciudad Cabañas MJ, Cuadrado Cenxual MA. Role of vitamin D in athletes. *Nutrients* 2020;12:579.
- [46] Petisco-Rodríguez C, Sánchez-Sánchez LC, Fernández-García R, Sánchez-Sánchez J, García-Montes JM. Disordered eating attitudes, anxiety, self-esteem and perfectionism in young athletes and non-athletes. *Int J Environ Res Public Health* 2020;17(18):6754.
- [47] Sanford-Martens TC, Davidson MM, Yakushko OF, Martens MP, Hinton P. Clinical and subclinical eating disorders: an examination of collegiate athletes. *J Appl Sport Psychol* 2005;17(1):79–86.
- [48] Gould RJ, Ridout AJ, Newton JL. Relative energy deficiency in sport in adolescents. *Int J Sports Med* 2023;44(4):236–46.
- [49] Pensgaard AM, Sundgot-Borgen J, Edwards C, et al. Intersection of mental health and REDs. *Br J Sports Med* 2023;57(17):1127–35.
- [50] Mountjoy M, et al. IOC consensus statement on RED-S: 2018 update. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 2018;28(4):316–31.
- [51] Attia E, Walsh BT. Eating disorders: a review. *JAMA* 2025;333(14):1242–52.

- [52] Ackerman KE, Holtzman B, Cooper KM, et al. Low energy availability surrogates correlate with health and performance consequences of RED-S. *Br J Sports Med* 2019;53(10):628–33.
- [53] Blundell JE, King NA. Effects of exercise on appetite control: loose coupling between energy expenditure and energy intake. *Int J Obes Relat Metab Disord* 1998;22(Suppl 2):S22–9.
- [54] Hubert P, King NA, Blundell JE. Uncoupling the effects of energy expenditure and energy intake: appetite response to short-term energy deficit induced by meal omission and physical activity. *Appetite* 1998;31:9–19.
- [55] Brenner JS, Labotz M, Sugimoto D, et al. The psychosocial implications of sport specialization in pediatric athletes. *J Athl Train* 2019;54(10):1021–9.
- [56] Jayanthi N, Pinkham C, Dugas L, Patrick B, LaBella C. Sports specialization in young athletes. *Sports Health* 2013;5(3):251–7.
- [57] Blagrove RC, Bruinvels G, Read P. Early sport specialization and intensive training in adolescent female athletes: risks and recommendations. *Strength Cond J* 2017;39(5):14–23.
- [58] DiFiori JP, Benjamin HJ, Brenner J, et al. Overuse injuries and burnout in youth sports: a position statement from the American Medical Society for Sports Medicine. *Clin J Sport Med* 2014;24 (1):3–20.
- [59] Delvaux F, Croisier JL, Kaux JF. La spécialisation précoce du jeune sportif: la route vers le succès ? *J Traumatol Sport* 2023;40 (3):155–60.
- [60] Tenforde AS, Fredericson M. Influence of sports participation on bone health in the young athlete. *PM R* 2011;3(9):861–7.
- [61] Nichols JF, Rauh MJ, Barrack MT, Barkai H, Pernick Y. Disordered eating and menstrual irregularity in high school athletes in lean-build and nonlean-build sports. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 2007;17(4):364–77.
- [62] Otis CL, Drinkwater B, Johnson M, Loucks AB, Wilmore JH. American College of Sports Medicine position stand: the female athlete triad. *Med Sci Sports Exerc* 1997;29:i–x.
- [63] Hoch AZ, Pajewski NM, Moraski L, et al. Prevalence of the female athlete triad in high school athletes and sedentary students. *Clin J Sport Med* 2009;19(5):421–8.
- [64] Williams NI, Helmreich DL, Parfitt DB, Caston-Balderrama A, Cameron JL. Evidence for a causal role of low energy availability in the induction of menstrual cycle disturbances during strenuous exercise training. *J Clin Endocrinol Metab* 2001;86(11):5184–93.
- [65] Freitas L, Bezerra A, Bopp G, Amorim T, Fernandes RJ, Fonseca H. Does swimming exercise impair bone health? A systematic review and meta-analysis comparing the evidence in humans and rodent models. *Sports Med* 2024;54(9):2373–94.
- [66] Freitas L, Bezerra A, Amorim T, et al. Is competitive swimming a risk factor for osteoporosis? *Ger J Exerc Sport Res* 2023;53:232–42.
- [67] Abrahin O, Rodrigues RP, Marçal AC, Alves EA, Figueiredo RC, de Sousa EC. Swimming and cycling do not cause positive effects on bone mineral density: a systematic review. *Rev Bras Reumatol Engl Ed* 2016;56(4):345–51.
- [68] Hilkens L, Schijndel VAN, Weijer N, Boerboom VM, VAN DER Burg E, Peters V, et al. Low bone mineral density and associated risk factors in elite cyclists at different stages of a professional cycling career. *Med Sci Sports Exerc* 2023;55(5):957–65.
- [69] Khodaei M, Olewinski L, Shadgan B, Kiningham RR. Rapid weight loss in sports with weight classes. *Curr Sports Med Rep* 2015;14(6).
- [70] 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. *J Eat Disord* 2022;10(1):75.
- [71] Zubac D, Karnincic H, Sekulic D. Rapid weight loss is not associated with competitive success in elite youth Olympic-style boxers in Europe. *Int J Sports Physiol Perform* 2018;13(7):860–6.
- [72] Choma CW, Sforzo GA, Keller BA. Impact of rapid weight loss on cognitive function in collegiate wrestlers. *Med Sci Sports Exerc* 1998;30(5):746–9.
- [73] Cengiz A. Effects of self-selected dehydration and rehydration on anaerobic power in elite wrestlers. *J Phys Ther Sci* 2015;27 (5):1441–4.
- [74] Burke LM, Slater GJ, Matthews JJ, et al. ACSM consensus on weight loss in weight-category sports. *Curr Sports Med Rep* 2021;20(4):199–217.
- [75] Carl RL, Johnson MD, Martin TJ, Council on sports medicine fitness. Promotion of healthy weight-control practices in young athletes. *Pediatrics* 2017;140(3):e20171871.

- [76] Angelidi AM, Stefanakis K, Chou SH, Valenzuela-Vallejo L, Dipla K, Boutari C, et al. Relative energy deficiency in sport (REDS): endocrine manifestations, pathophysiology and treatments. *Endocr Rev* 2024;45(5):676–708.
- [77] Howarth KR, Phillips SM, MacDonald MJ, et al. Effect of glycogen availability on muscle protein turnover. *J Appl Physiol* 2010;109(2):431–8.
- [78] Hearris MA, Hammond KM, Fell JM, Morton JP. Regulation of muscle glycogen metabolism during exercise. *Nutrients* 2018;10:298.
- [79] Torstveit MK, Ackerman KE, Constantini N, et al. Prevention of REDs. *Br J Sports Med* 2023;57(17):1119–28.
- [80] Ackerman KE, Singhal V, Baskaran C, et al. Oestrogen replacement improves bone mineral density in athletes. *Br J Sports Med* 2019;53(4):229–36.
- [81] Marí-Sanchis A, Burgos-Balmaseda J, Hidalgo-Borrajo R. Eating disorders in sport. *Endocrinol Diabetes Nutr* 2022;69(2):131–43.
- [82] Cialdella-Kam L, Guebels CP, Maddalozzo GF, Manore MM. Dietary intervention restored menses in female athletes. *Nutrients* 2014;6(8):3018–39.
- [83] De Souza MJ, Ricker EA, Mallinson RJ, et al. Bone mineral density response to increased energy intake: the REFUEL trial. *Am J Clin Nutr* 2022;115(6):1457–72.
- [84] Poličnik R, Hristov H, Lavriša Ž. et al. Dietary intake of adolescents and alignment with recommendations. *Nutrients* 2024;16 (12):1912.
- [85] Reardon CL, Hainline B, Aron CM, et al. Mental health in elite athletes. *Br J Sports Med* 2019;53(11):667–99.
- [86] Jeukendrup AE, Areta JL, Van Genechten L, et al. Does REDs syndrome exist? *Sports Med* 2024;54(11):2793–816