



Influence d'une période de restriction alimentaire sur les marqueurs salivaires du stress, les paramètres psychologiques et la performance chez des haltérophiles de haut niveau

Alexandre Durguerian

► To cite this version:

Alexandre Durguerian. Influence d'une période de restriction alimentaire sur les marqueurs salivaires du stress, les paramètres psychologiques et la performance chez des haltérophiles de haut niveau. Alimentation et Nutrition. Université Paris Saclay (COMUE), 2017. Français. NNT : 2017SACLS025 . tel-01523453

HAL Id: tel-01523453

<https://theses.hal.science/tel-01523453>

Submitted on 16 May 2017

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.

NNT : 2017SACLS025

THESE DE DOCTORAT
DE
L'UNIVERSITE PARIS-SACLAY
PREPAREE A
L'UNIVERSITE PARIS-SUD

ECOLE DOCTORALE N° 566
Sciences du Sport, de la Motricité et du Mouvement Humain

Sciences du Sport et du Mouvement Humain

Par

M. Alexandre Durguerian

Influence d'une période de restriction alimentaire sur les marqueurs salivaires
du stress, les paramètres psychologiques et la performance
chez des haltérophiles de haut niveau

Thèse présentée et soutenue à Orsay, le 27 janvier 2017 :

Composition du Jury :

Mme Le Scanff, Christine, Professeure des Universités, Université Paris-Sud, Présidente du jury
M. Passelergue, Philippe, Maître de Conférences, HDR, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Rapporteur
M. Portier, Hugues, Maître de Conférences, HDR, Université Paris-Diderot, Rapporteur
M. Thivel, David, Maître de Conférences, HDR, Université Clermont 2, Examineur
Mme Filaire, Edith, Professeure des Universités, Université Paris-Sud, Université d'Orléans, Directrice de thèse
M. Bougard, Clément, Chercheur, Institut de Recherche Biomédicale des Armées (IRBA), Co-encadrant

REMERCIEMENTS

J'arrive enfin à cette partie des remerciements. Bien qu'elle constitue l'ouverture du manuscrit, elle représente généralement l'étape finale d'un long et fastidieux travail. En rédigeant ces quelques lignes, je me remémore ce jour de mai 2012 où tout a commencé. Depuis ce moment, le chemin fût long, difficile, marqué de hauts (parfois) et de bas (très souvent). A la suite de ces quatre années, je suis fier de vous présenter le travail que nous avons accompli. J'estime qu'il m'a permis de progresser, d'acquérir des connaissances et des compétences, mais également d'évoluer sur un plan personnel. Néanmoins, ce travail, cette progression et cette évolution n'auraient pas été possibles sans l'aide et le soutien de certaines personnes que je tenais à remercier au travers de ces quelques lignes.

A Edith Filaire. Merci pour ton encadrement, tes conseils avisés et ta réactivité légendaire ! Tu m'as permis d'appréhender la complexité de la recherche et de la publication scientifique. Ton expérience et ton expertise m'ont toujours permis de garder le cap et d'aller de l'avant.

A Clément Bougard. Merci de m'avoir accompagné et de m'avoir accordé de ton temps pendant toutes ces années. Merci pour ta présence si précieuse pendant le protocole.

Aux membres du jury. Merci d'avoir bien voulu apporter la qualité de vos jugements à ce travail.

A Mounir Chennaoui, Catherine Drogou et Fabien Sauvet. Merci pour votre soutien technique et logistique tout au long de ce travail.

A Christine Hanon. Merci de m'avoir ouvert ta porte, d'avoir accepté de m'écouter et d'avoir contribué à lancer ce projet.

Aux athlètes. Merci pour votre participation et votre investissement sans faille. Sans vous, ce travail n'aurait pas pu voir le jour.

A ma famille. Merci pour vos encouragements et pour tous ces moments si précieux que nous passons ensemble. Ils sont l'essence même du bonheur.

A mes amis.

A mes amis et collègues du CNR de Marcoussis, Julien(s), Mathieu, Antho, Robin, Alexis, Bertrand et Lionel. Merci pour votre accueil, c'est un réel plaisir de travailler à vos côtés.

A Elo, Julien, et mes 2 Nico. Merci de m'avoir toujours soutenu et d'avoir cru en moi.

A Sam, mon pote et mon meilleur collègue de travail ! Une autre de mes aventures pour laquelle tu auras été présent.

A Patricia, Jean, Elodie et Geoffrey. A ma belle-famille du Ch'Nord, votre accueil chaleureux et votre générosité m'ont fait découvrir les vraies valeurs de cette belle région ! Merci Patricia et Jean pour toutes vos gentilles attentions et surtout, de m'avoir toujours laissé une petite place pour travailler. Maintenant place aux cabanes !!!

A Sandra, Thomas et notre petit Luca. Malgré la distance qui nous sépare depuis quelques années, votre amour et votre soutien m'ont accompagné tout au long de ce parcours. Où que vous soyez, vous pourrez toujours compter sur moi.

A mes parents. J'ai tant attendu ces quelques lignes, maintes et maintes fois imaginé leur contenu pour vous remercier et vous témoigner mon amour. A ma maman en Or Nevart, tu m'as transmis le goût et la passion d'apprendre. Tu m'as inculqué les valeurs du travail, du respect et de la persévérance. A mon papa Sarkis, mon Père et mon Coach ! Ils ont tellement raison ceux qui me disent « t'as de la chance d'avoir un père comme ça ! ».

Vous êtes ma Base et mon Sommet, les piliers indéfectibles sur lesquels j'ai pu m'appuyer pour construire ma Vie. Que ce travail témoigne de l'amour, de la reconnaissance et du respect que je vous porte.

A ma compagne, Jessica. Tu m'as rencontré à l'époque où je débutais cette aventure. Tu as supporté, mais tu as également su porter ce projet, qui pourtant n'était pas le tien au départ. Grâce à ton amour, ton soutien, ta patience et tes bons petits plats, **Nous** sommes enfin parvenus au bout de cette épreuve qui nous accaparait tant. Aujourd'hui, démarre le 1^{er} jour de notre nouvelle Vie !

SOMMAIRE

LISTE DES PUBLICATIONS	8
LISTE DES COMMUNICATIONS	9
INDEX DES FIGURES	10
INDEX DES TABLEAUX	12
INDEX DES EQUATIONS	14
CADRE THEORIQUE	17
I. LA PERTE DE POIDS CHEZ LE SPORTIF	21
I.1. UNE PRATIQUE COURANTE CHEZ LE SPORTIF	21
I.2. LES DIFFERENTES METHODES DE PERTE DE POIDS	27
I.3. LES SOLUTIONS ENVISAGEES POUR LUTTER CONTRE CES PRATIQUES	28
II. INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE SUR LES SYSTEMES PHYSIOLOGIQUES DE REPONSE AU STRESS	30
II.1. LES SYSTEMES PHYSIOLOGIQUES DE REPONSE AU STRESS	30
II.2. REPONSES DES SYSTEMES PHYSIOLOGIQUES DU STRESS	46
III. INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE SUR LES PARAMETRES PSYCHOLOGIQUES	59
III.1. LES PARAMETRES PSYCHOLOGIQUES ET PERFORMANCE SPORTIVE	59
III.2. INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE	62
III.3. LA PERTE DE POIDS, UN AVANTAGE PSYCHOLOGIQUE ?	65
IV. INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE SUR LA PERFORMANCE	67
IV.1. APPORTS NUTRITIONNELS, ADAPTATIONS A L'ENTRAINEMENT ET PERFORMANCES	67
IV.2. QUELS TYPES DE PERFORMANCE ET QUELLES CONSEQUENCES ?	67
V. CARACTERISTIQUES ET CONTRAINTES DE L'HALTEROPHILIE	77
V.1. L'HALTEROPHILIE, DISCIPLINE OLYMPIQUE	77
V.2. FACTEURS DE LA PERFORMANCE EN HALTEROPHILIE	78
V.3. RESTRICTION ALIMENTAIRE ET PERTE DE POIDS EN HALTEROPHILIE	79

VI. PROBLEMATIQUES ET HYPOTHESES	80
VI.1. PROBLEMATIQUES	80
VI.2. HYPOTHESES	80
VII. LE PROTOCOLE EXPERIMENTAL	82
VII.1. SUJETS	82
VII.2. DESCRIPTION DU PROTOCOLE	83
VII.3. LES PARAMETRES ANTHROPOMETRIQUES	88
VII.4. LE COMPORTEMENT ALIMENTAIRE	88
VII.5. LA CHARGE D'ENTRAINEMENT	91
VII.6. LES INDICATEURS PHYSIOLOGIQUES	92
VII.7. LES PARAMETRES PSYCHOLOGIQUES	96
VII.8. LA PERFORMANCE	96
VII.9. ANALYSES STATISTIQUES	99
VIII. ARTICLE 1 : INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE SUR LA PERFORMANCE ET LES PARAMETRES PSYCHOLOGIQUES CHEZ DES HALTEROPHILES DE HAUT NIVEAU	101
IX. ARTICLE 2 : INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE SUR LES SYSTEMES PHYSIOLOGIQUES DE REPONSE AU STRESS	125
X. ARTICLE 3 : INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE SUR LES REPONSES PHYSIOLOGIQUES A UNE COMPETITION SIMULEE	153
XI. DISCUSSION GENERALE	173
XI.1. INFLUENCE SUR LE NIVEAU DE PERFORMANCE	173
XI.2. INFLUENCE SUR LES PARAMETRES PSYCHOLOGIQUES	178
XI.3. INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE SUR L'ACTIVITE DES SYSTEMES PHYSIOLOGIQUES DU STRESS	181
XII. LIMITES ET PERSPECTIVES	191
XII.1. LIMITES DE L'ETUDE	191
XII.2. CONCLUSION GENERALE	192
XII.3. PERSPECTIVES	193
BIBLIOGRAPHIE	195
TABLES DES MATIERES	213

LISTE DES PUBLICATIONS

Publications scientifiques :

Durguerian, A., Bougard, C., Drogou, C., Sauvet, F., Chennaoui, M., & Filaire, E. (2016).

Weight loss, performance, psychological related states in high-level weightlifters.

International Journal of Sports Medicine, 37, 230-238. **Impact factor = 2,528**

Durguerian, A., Filaire, E., Drogou, C., Sauvet, F., Bougard, C., & Chennaoui, M. (2016).

Hyperactivity of the sympatho-adreno-medullary system without any modification of the hypothalamic-pituitary-adrenal axis following food restriction among high-level weightlifters. *Journal of Strength and Conditioning Research*, **accepté avec révisions**.

Impact factor = 1,978

Durguerian, A., Filaire, E., Drogou, C., Bougard, C., & Chennaoui, M. (2016). Food

restriction alters salivary cortisol and α -amylase responses to a simulated weightlifting competition without significant performance modification. *Journal of Sports Sciences*,

accepté avec révisions. Impact factor = 2,142

Articles de vulgarisation :

Durguerian, A., Filaire, E., Drogou, C., Bougard, C., & Chennaoui, M. (2016). Se préparer au

combat. Dossier spécial, la préparation à la performance dans les sports de combat.

Réflexions Sport, 12, 77-81.

LISTE DES COMMUNICATIONS

Durguerian, A., Filaire, E., Drogou, C., Sauvet, F., Bougard, C., & Chennaoui, M. (2015).

Dissociation de l'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien et du système nerveux sympathique, altération des indicateurs psychologiques et performance à la suite d'une perte de poids rapide chez des haltérophiles de haut niveau. *Communication présentée au 16^{ème} Congrès international de l'ACAPS, Nantes, France.*

Durguerian, A., Filaire, E., Drogou, C., Sauvet, F., Bougard, C., & Chennaoui, M. (2015).

Perte de poids et sports de combat. *Communication présentée aux 9^{ème} Entretiens de l'INSEP, Paris, France.*

INDEX DES FIGURES

✓ *Manuscrit*

Figure 1: Description du protocole expérimental. POMS = Profile of Mood States ; RESTQ = REcovery and STress Questionnaire; EAT-26 = Eating Attitudes Test; CMJ = Countermovement Jump 87

Figure 2: Illustration de photographies prises avant et après un repas pour quantifier les apports nutritionnels du participant, identifié à l'aide d'une étiquette indiquée par le cercle rouge sur la photo 91

Figure 3: Quantification de la charge d'entraînement en fonction de la période et du groupe 92

Figure 4: Modalités de prélèvement et de traitement des échantillons de capillaires sanguins 93

Figure 5: Illustration de la phase d'aliquotage des échantillons salivaires 95

✓ *Article 1*

Figure 1: Experimental timeline. The test battery was performed during a period of weight maintenance (T_1), after a 6-d food restriction (T_2). 106

✓ *Article 2*

Figure 1: Experimental design. Body weight was kept constant between T_1 and T_2 . At the end of T_2 , the Diet group ($n=6$) was asked to lose 5% of their body weight in 6 days, while participants of the Control group had to maintain their body weight constant. CMJ Test = Countermovement Jump Test; POMS = Profile of Mood States; RESTQ = Recovery-Stress Questionnaire. 131

Figure 2: Physical performance variation (in %) at T_3 , following a 6-d food restriction for the Diet group only, in comparison to performance level observed after a weight maintenance period (T_2). Performance was evaluated through a Countermovement Jump test (CMJ) and a maximal weightlifting test, using the snatch and the clean and jerk (CJ) movements. Weightlifting performance was quantified as absolute performance in kilograms (kg) and using the Sinclair coefficient (Arbitrary Units, AU), based on athletes' body weight, allowing for intra-individual comparisons. Data are expressed as mean $\pm$ SD. * Significantly different from T_2 ($p < 0.05$). 142

Figure 3: Awakening patterns of salivary cortisol and DHEA concentrations and salivary alpha-amylase activity for the Control group and the Diet group during the weight maintenance period (T₂) and following a 6-d food restriction (T₃) for the Diet group only. Data are expressed as mean ± SEM.

..... 145

✓ Article 3

Figure 1: Experimental timeline. Body weight was kept constant between T₁ and T₂, and was used as a baseline phase. At the end of T₂, the Diet group (n=6) was asked to lose 5% of their body weight in six days, only using dietary restriction, while members of the Control group had to maintain their body weight constant. CMJ Test = Countermovement Jump Test..... 157

Figure 2: Salivary cortisol concentrations and sAA activity (mean ± SEM) for the Control group (A-C) and the Diet group (B-D) at weigh-in (Weigh-in, 02:00-02:15 PM), after the third snatch attempt (Post-snatch, 04:45-05:00 PM) and after the third CJ attempt (Post-CJ, 05:45-06:00 PM) of a simulated competition held during a weight-maintenance period (T₂) and after a six-day period of food restriction (T₃) for the Diet group only.* Significant difference between both periods (T₂ vs T₃) (P < 0.05). \$ Significant difference from the preceding point in time (P < 0.05). 165

Figure 3: AUC_{gsC} (A) and AUC_{gsAA} (B) (mean ± SEM) during a simulated weightlifting competition held during a weight maintenance period (T₂) and after a six-day period of food restriction (T₃) for the Diet group only. * Significant difference between both periods (T₂ vs T₃) (P < 0,05). 166

Figure 4: Post-snatch and post-CJ variation for salivary cortisol concentrations (A) and sAA activity (B) (mean ± SEM) during a simulated weightlifting competition held during a weight maintenance period (T₂) and after a six-day period of food restriction (T₃) for the Diet group only. The variation was calculated based on the difference between the weigh-in value and the post-snatch or CJ values. * Significant difference between both periods (T₂ vs T₃) (P < 0.05). # Significant difference between groups at the same time point (P < 0.05)..... 167

INDEX DES TABLEAUX

✓ *Manuscrit*

Tableau 1: Synthèse des données de la littérature concernant les pratiques de perte de poids chez des sportifs de différentes disciplines 24

Tableau 2: Influence de la perte de poids sur le niveau de performance physique. 73

Tableau 3: Caractéristiques anthropométriques des sujets au début du protocole (T₁), après 6 jours à poids constant (T₂) et après 6 jours de restriction alimentaire, pour le groupe Restriction uniquement (T₃) 83

Tableau 4: Evolution de la glycémie et des indicateurs biochimiques (natrémie, kaliémie et calcémie) au début du protocole (T₁), après 6 jours à poids constant (T₂) et après 6 jours de restriction alimentaire, pour le groupe Restriction uniquement (T₃). Les valeurs sont présentées en moyenne $\pm$ ET 94

✓ *Article 1*

Table 1: Age, competitive weightlifting experience and body composition for control (Group 1) and diet (Group 2) groups at T₁ (weight maintenance, and after a 6-d food restriction for Group 2 (T₂), the morning of a simulated competition (mean $\pm$ SD). 105

Table 2: Weightlifting performance during the simulated competition at T₁ (Weight maintenance period) and T₂ (after a 6-d food restriction for Group 2). Data are expressed as mean $\pm$ SD. 115

Table 3: Mean daily intakes of energy, macronutrients, micronutrients and water at T₁ (weight maintenance period) and T₂ (after a 6-d food restriction for Group 2). Data are expressed as mean $\pm$ SD. For comparison, French recommendations for athletes (FRA) are added [56]. Group 1: control; Group 2: diet group. 116

Table 4: Psychological profiles (POMS and REST-Q) (mean $\pm$ SD) during the investigation. (T₁: weight maintenance period; T₂: after a 6-d food restriction)..... 118

✓ Article 2

Table 1: Age, competitive weightlifting experience and height for the Control group and the Diet group at baseline (T₁). Data are expressed as mean ± SD. 132

Table 2: Anthropometric data for the Control group and the Diet group during the weight maintenance period (T₁ and T₂) and following a 6-d food restriction (T₃) for the Diet group only. BMI = Body Mass Index; FFM = Fat-Free Mass. Data are expressed as mean ± SD. 139

Table 3: Mean daily dietary intakes for the Control group and the Diet group during the weight maintenance period and during a 6-d food restriction for the Diet group only. For comparison, French recommendations for athletes (FRA) are indicated (46). Data are expressed as mean ± SD. 140

Table 4: Psychological parameters, measured through the Profil of Mood States (POMS) questionnaire and the Recovery-Stress questionnaire for athletes (RESTQ-Sport), at baseline (T₁), at the end of the weight maintenance period (T₂) and following a 6-d food restriction (T₃) for the Diet group only. Data are expressed as mean ± SD. 143

✓ Article 3

Table 1: Anthropometric data (mean ± SD) for the Control group and the Diet group during the weight maintenance period (between T₁ and T₂) and after a six-day period of food restriction (T₃) for the Diet group only. 162

Table 2: Physical performance (mean ± SD) evaluated through a Countermovement Jump test (CMJ) before a maximal weightlifting test, during a weight-maintenance period (T₂) and after a six-day period of food restriction (T₃) for the Diet group only. Weightlifting performance was quantified using both absolute (kg) and relative performance level (AU, arbitrary units). 163

INDEX DES EQUATIONS

Équation 1 : Formule de calcul de l'aire sous la courbe selon Pruessner et al. (2003), où n représente le nombre total de mesures réalisées et m_i représente un point de mesure individuel..... 100

CADRE THEORIQUE

Une fois la pesée passée, c'est la libération. Vous ne pouvez pas vous imaginer le goût extraordinaire que peut avoir l'eau après deux jours de privation. S. Guenot (2008), champion olympique de lutte gréco-romaine

Balance, pesée, perte de poids, régime.... Avant même d'avoir débuté la compétition, le sportif livre son premier combat, celui de « faire le poids ». En plus des contraintes du contexte compétitif, il doit également appréhender l'angoisse inhérente à l'implacable couperet de la pesée. En 2000, aux Jeux Olympiques de Sydney, la judoka Britannique Deborah ALLAN, dans la catégorie des -52kg, accuse 400 grammes de trop sur la balance. Elle aura beau se dénuder et réclamer une paire de ciseaux pour sacrifier ses longs cheveux, elle est disqualifiée pour une cinquantaine de grammes. Tel est le lourd fardeau des boxeurs, judokas, haltérophiles, rameurs, et autres sportifs soumis à une pesée officielle pour valider leur participation à la compétition. Dans ces disciplines, la perte de poids s'est intimement ancrée dans la culture sportive. L'intensité des méthodes utilisées est devenue un vecteur de reconnaissance et de valorisation auprès de ses pairs (Pettersson, Ekström, & Berg, 2013). Ce contexte conduit les sportifs à recourir à des pratiques extrêmes (e.g. jeûne, déshydratation sévère), ayant abouti à des conséquences tragiques par le passé (Artioli, Gualano, et al., 2010; Franchini, Brito, & Artioli, 2012; Steen & Brownell, 1990; Sundgot-Borgen & Garthe, 2011). L'une des méthodes les plus couramment utilisées est la restriction alimentaire (Degoutte et al., 2006; Franchini et al., 2012; Mäestu, Eliakim, Jürimäe, Valter, & Jürimäe, 2010; Martinen, Judelson, Wiersma, & Coburn, 2011). Certains sportifs vont jusqu'à se priver complètement d'apports alimentaires dans les dernières heures précédant la compétition (Filaire, Rouveix, Pannafieux, & Ferrand, 2007; Hall & Lane, 2001). Comment peut-on

imaginer que ces méthodes puissent être bénéfiques à la performance ? Malheureusement, il est difficile de trancher sur cette question tant les résultats sont divergents dans la littérature ; certains auteurs ayant rapporté une diminution significative du niveau de performance (Degoutte et al., 2006; Filaire, Maso, Degoutte, Jouanel, & Lac, 2001; Horswill, Hickner, Scott, Costill, & Gould, 1990; Jlid, Maffuli, Elloumi, Moalla, & Paillard, 2013; Koral & Dosseville, 2009; Mero et al., 2010; Mettler, Mitchell, & Tipton, 2010; Robinson, Lambeth-Mansell, Gillibrand, Smith-Ryan, & Bannock, 2015; Roemmich & Sinning, 1997b; Viitasalo, Kyröläinen, Bosco, & Alen, 1987; Walberg et al., 1988), alors que d'autres n'ont pas observé de variation significative, voire une augmentation du niveau de performance (Fogelholm, Koskinen, Laakso, Rankinen, & Ruokonen, 1993; Garthe, Raastad, Refsnes, Koivisto, & Sundgot-Borgen, 2011; Hall & Lane, 2001; Helms, Zinn, Rowlands, Naidoo, & Cronin, 2015; Judelson et al., 2007; Koral & Dosseville, 2009; Marttinen et al., 2011; Mero et al., 2010; Mettler et al., 2010; Paoli et al., 2012; Sawyer et al., 2013; Viitasalo et al., 1987). Les modalités d'évaluation de la performance, ainsi que les processus de perte de poids utilisés sont autant de facteurs pouvant expliquer la diversité de ces résultats (Fogelholm, Koskinen, Laakso, Rankinen, & Ruokonen, 1993; Wilson et al., 2012). De plus, de nombreux sportifs perçoivent la pratique de la perte de poids comme un facteur essentiel à leur préparation mentale et un élément facilitant leur performance sportive (Hall & Lane, 2001 ; Pettersson et al., 2013). De nombreuses études ont néanmoins montré que la restriction alimentaire engendrait un impact négatif sur les paramètres psychologiques, notamment sur l'humeur (Degoutte et al., 2006 ; Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001 ; Hall & Lane, 2001 ; Helms et al., 2015 ; Koral & Dosseville, 2009 ; Marttinen et al., 2011 ; Mettler et al., 2010). Sur le plan physiologique, la restriction des apports alimentaires semble influencer l'activité des systèmes physiologiques du stress, qui sont l'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien (HHS) et le système sympatho-adreno-médullaire (SAM). En effet, certains auteurs ont montré une

hyperactivité de l'axe HHS, se traduisant par une augmentation des concentrations salivaires ou plasmatiques du cortisol (Degoutte et al., 2006; Filaire, Massart, Hua, & Le Scanff, 2015; Jakubowicz, Beer, Beer, & Nestler, 1995; Monteleone et al., 2011; Oskis, Loveday, Hucklebridge, Thorn, & Clow, 2012; Oskis, Loveday, Hucklebridge, Wood, & Clow, 2012; Tomiyama et al., 2010). Parallèlement, une hypoactivité du système SAM, caractérisée par une diminution de l'activité de l' α -amylase salivaire a été constatée (Filaire et al., 2015 ; Monteleone et al., 2011). De plus, une dissociation de la coordination de la réponse physiologique au stress a été notée, indiquant que la restriction alimentaire induisait un état de stress et entraînait un dysfonctionnement de l'activité des systèmes physiologiques du stress (Filaire et al., 2015 ; Monteleone et al., 2011). Néanmoins, les données se rapportant aux sportifs de haut niveau sont rares et ont montré des résultats divergents (Abdelmalek, Chtourou, Souissi, & Tabka, 2015; Degoutte et al., 2006; Mettler et al., 2010; Roemmich & Sinning, 1997a; Schaal, Tiollier, Le Meur, Casazza, & Hausswirth, 2016). Par ailleurs, les études se sont majoritairement concentrées sur des disciplines comme le judo ou la lutte, et peu ont étudié l'influence de la restriction alimentaire en situation de compétition (Franchini et al., 2012 ; Martinen et al., 2011).

Nos travaux de recherche ont porté sur l'haltérophile, qui est une discipline organisée avec des catégories de poids de corps. Bien que très peu étudiée, la perte de poids est une méthode particulièrement répandue chez les haltérophiles de haut niveau et d'une ampleur similaire à celle observée dans les sports de combat (Dreschler, 1998; Storey & Smith, 2012). Le choix de l'haltérophilie comme support de nos recherches est apparu particulièrement intéressant du fait de l'objectivité de la mesure de la performance, paramètre faisant défaut dans les études portant sur les sports de combat. L'objet de notre étude était donc d'évaluer le comportement alimentaire des haltérophiles de haut niveau lorsqu'ils sont exposés à une contrainte de perte de poids rapide et d'étudier l'impact de cette restriction alimentaire sur l'activité des systèmes

physiologiques du stress, les paramètres psychologiques et le niveau de performance lors d'une compétition simulée d'haltérophilie. Nous avons émis l'hypothèse que la restriction alimentaire était comparable à celle décrite dans les sports de combat et induisait (1) un dysfonctionnement des systèmes physiologiques de réponse au stress, (2) une altération des paramètres psychologiques et (3) une dégradation du niveau de performance.

I. LA PERTE DE POIDS CHEZ LE SPORTIF

Certains sportifs cherchent à devenir plus minces pour améliorer leur ratio $\text{Puissance}/\text{Poids}$, d'autres cherchent à se conformer à des standards esthétiques propres à leur discipline, enfin d'autres souhaitent intégrer une catégorie de poids inférieure pour bénéficier d'un avantage physique sur leurs adversaires (Sundgot-Borgen & Garthe, 2011). À l'approche de la compétition, tous ces sportifs sont focalisés sur la gestion de leur poids, cet objectif devenant aussi important que l'entraînement. Dans cette première partie, nous aborderons les raisons inhérentes à ces comportements, souvent extrêmes, et nous décrirons les différents procédés mis en œuvre, particulièrement au regard de la restriction alimentaire.

I.1. Une pratique courante chez le sportif

a) Les caractéristiques de la perte de poids

Le tableau 1 récapitule les caractéristiques de la perte de poids décrites dans la littérature scientifique parmi les populations sportives. La perte de poids est une pratique courante et traditionnelle dans le sport de compétition. Des pertes de poids par déshydratation ont été décrites dès les années 1930 (Turocy et al., 2011). La perte de poids est largement répandue dans le milieu sportif et touche aussi bien les hommes que les femmes (Artioli, Gualano, et al., 2010; Da Silva Santos, Takito, Artioli, & Franchini, 2016; Franchini et al., 2012). Les principaux travaux qui se sont intéressés à la question rapportent que 60 à 100% des sportifs concernés pratiquent régulièrement des pertes de poids dans leur saison sportive (Da Silva Santos et al., 2016; Filatre et al., 2007; Franchini et al., 2012; Hall & Lane, 2001; Pettersson et al., 2013; Steen & Brownell, 1990; Sundgot-Borgen & Garthe, 2011) (Tableau 1). Ces pertes de poids sont importantes, rapides et fréquentes. Hall & Lane (2001) ont décrit 4 zones

de poids de corps chez des boxeurs amateurs ; le poids de corps normal, d'entraînement, de compétition par équipe et de championnat. Le différentiel entre le poids de corps normal et celui de compétition est généralement compris entre 5 et 10% du poids de corps, ce qui nécessite une régulation conséquente avant la compétition (Hall & Lane, 2011 ; Franchini et al., 2012 ; Steen & Brownell, 1990) (Tableau 1). Certains auteurs rapportent des pertes de poids allant jusqu'à 12 kg ou 13% du poids de corps avant la compétition (Paillard, 2006; Sundgot-Borgen & Garthe, 2011), ce qui témoigne de l'extrême sévérité du processus.

Au-delà de l'importance de la perte de poids, la durée du processus est également un facteur influençant le comportement des sportifs, ainsi que les répercussions sur les paramètres physiologiques et psychologiques (Tableau 1). Les sportifs semblent privilégier des processus rapides, c'est-à-dire concentrées sur les 2 à 7 jours avant l'échéance, par rapport à des pertes de poids progressives, qui s'étalent sur des durées supérieures à 1 semaine (Artioli, Gualano, et al., 2010; Franchini et al., 2012; Hall & Lane, 2001; Marttinen et al., 2011; Paillard, 2006; Pettersson, Ekström, & Berg, 2012; Pettersson et al., 2013; Roemmich & Sinning, 1997b; Steen & Brownell, 1990; Sundgot-Borgen & Garthe, 2011). D'autres études ont noté qu'une perte de poids progressive, basée sur une restriction énergétique moins importante et étalée sur une période plus longue, limitait la perte de masse maigre et avaient un effet bénéfique sur la performance (Fogelholm et al., 1993; Garthe et al., 2011; Mero et al., 2010).

La fréquence des pertes de poids, jusqu'à 15 fois dans une saison, implique l'utilisation récurrente des stratégies de perte de poids (Paillard, 2006; Roemmich & Sinning, 1997b; Steen & Brownell, 1990). Par ailleurs, les caractéristiques de la perte de poids, et notamment les méthodes utilisées, semblent être aggravées par la précocité du phénomène. Steen & Brownell (1990) ont rapporté que la mise en place des stratégies de perte de poids débute, en moyenne, dès l'âge de 14 ans chez les lutteurs. De la même manière, Roemmich & Sinning (1997b) ont observé, au cours d'un suivi longitudinal d'une saison sportive chez de jeunes

lutteurs (15 ans), des pertes de poids fréquentes et significatives, de l'ordre de 4.8% de la masse corporelle. La précocité et la récurrence de ces pratiques ont été confirmées ultérieurement et semblent constituer les prémices d'une gradation de ces comportements avec l'âge (Artioli, Gualano, et al., 2010; Sundgot-Borgen & Garthe, 2011).

Tableau 1 : Synthèse des données de la littérature concernant les pratiques de perte de poids chez des sportifs de différentes disciplines

Etude	Population étudiée	Proportion des sportifs concernés	Amplitude de la perte de poids	Modalités de la perte de poids	Méthodes utilisées
Steen & Brownell (1990)	Lutteurs Lycée-Université	89% (université) 68% (lycée)	4.4 kg (université) 3.3 kg (lycée)	Rapide 3-4 jours	Déshydratation active Déshydratation passive Restriction alimentaire Restriction hydrique Diurétiques et/ou laxatifs Vomissements
Roemmich & Sinning (1997b)	Lutteurs Compétition Adolescents	100%	2-3 kg ou 4.8% du poids de corps	3 jours	Restriction alimentaire
Hall & Lane (2001)	Boxeurs Compétition Adultes	100%	2-3 kg	Rapide 1 semaine	Restriction alimentaire Restriction hydrique Exercice
Filaire et al. (2007)	Judokas et cyclistes de niveau national	65% rapportent des pertes de poids > 3kg	3.1-3.4 kg	Non précisé	Jeûne Diurétiques et/ou laxatifs Vomissements Exercice
Artioli, Gualano, et al. (2010)	607 Hommes 215 Femmes Judo Niveau départemental à international	89% Pas de différence Hommes/Femmes	6% en moyenne	Rapide 3-7 jours	Déshydratation active Déshydratation passive Restriction alimentaire Restriction hydrique Diurétiques et/ou laxatifs Pilules « coupe-faim » Vomissements

Sundgot-Borgen & Garthe (2011)	Revue de littérature Sports de combat	94% des sportifs interrogés	3-6%	Non précisé	Déshydratation active Déshydratation passive Restriction alimentaire, Jeûne Restriction hydrique Diurétiques et/ou laxatifs Vomissements
Franchini et al. (2012)	Revue de littérature Sports de combat	55-100%	2-5% en moyenne Jusqu'à plus de 10%	Rapide 1 semaine	Déshydratation active Déshydratation passive Restriction alimentaire, jeûne Restriction hydrique Diurétiques et/ou laxatifs Vomissements
Pettersson et al. (2013)	Sports de combat	79% des sportifs interrogés	5% en moyenne	Rapide ou Progressive Individus dépendant	Déshydratation active Déshydratation passive Restriction alimentaire Restriction hydrique Exercice
Da Silva Santos et al. (2016)	Taekwondo	75-91% des sportifs interrogés	3% en moyenne	10-20 jours avant la compétition 2-4 fois / saison	Déshydratation active Déshydratation passive Restriction alimentaire, jeûne Diurétiques et/ou laxatifs Pilules « coupe-faim »

b) Les raisons de ces pratiques

Il est raisonnable de s'interroger sur les motivations conduisant les sportifs à ces comportements. Les interviews réalisées rapportent que les phénomènes identitaires et culturels de la discipline, l'impact sur la préparation psychologique à la compétition et l'avantage psychologique perçu par le sportif sont les principaux facteurs expliquant l'engagement dans des pratiques de perte de poids (Filaire et al., 2007; Hall & Lane, 2001; Pettersson et al., 2012, 2013; Steen & Brownell, 1990).

La perte de poids est culturellement ancrée dans la tradition de nombreuses disciplines et représente une phase incontournable de la préparation à la compétition. Dans les sports de combat, réduire son poids de corps permettrait d'affronter des adversaires de gabarit inférieur et, par conséquent, de bénéficier d'un avantage physique sur ses adversaires (Pettersson et al., 2013). Au-delà des croyances, les mécanismes identitaires et culturels contribuent au sentiment d'appartenance à un groupe et incitent le sportif à se conformer et reproduire les pratiques de ce groupe (Pettersson et al., 2013; Steen & Brownell, 1990). La capacité à tolérer des pertes de poids importantes est perçue comme un signe de pugnacité et comme un vecteur d'intégration et de reconnaissance par ses pairs (Pettersson et al., 2013; Steen & Brownell, 1990). De plus, la valorisation des pratiques utilisées par les sportifs de haut niveau favorise l'identification de certains individus au comportement de leurs modèles sportifs. Dans cette perspective, l'entourage du sportif (i.e. partenaires d'entraînement, entraîneurs et famille) a été décrit comme un facteur facilitant (Filaire et al., 2007; Pettersson et al., 2013).

Les chercheurs ont également observé que les modalités du règlement technique, tels que l'écart entre les catégories de poids, la période entre la pesée et le début de la compétition, ainsi que le nombre de pesée(s) durant l'épreuve pouvaient influencer le comportement du sportif (Franchini et al., 2012; Sundgot-Borgen & Garthe, 2011). Franchini et al. (2012)

considèrent que plus l'écart entre les catégories est restreint, plus la tentation de perdre du poids est grande. Inversement, Sundgot-Borgen & Garthe (2011) estiment qu'un écart important entre les catégories et un temps de récupération important après la pesée favoriseraient des comportements extrêmes. Enfin, le manque de sensibilisation à la perte de poids, ainsi que le manque de connaissances en matière de nutrition sportive, rapportés chez le sportif et son entourage, faciliteraient l'utilisation de méthodes de perte de poids anarchiques, pouvant être néfastes à la performance et à la santé du sportif (Franchini et al., 2012; Pettersson et al., 2013; Turocy et al., 2011).

I.2. Les différentes méthodes de perte de poids

Maybe I'll eat two bananas and two protein shakes a day, and the last two days almost nothing. Then it's only some water, maybe half a litre immediately after practise, so it's practically nothing. So you know I'm constantly thirsty. Pettersson et al. (2012)

La perte de poids par déshydratation est pratiquée depuis les années 1930 (Turocy et al., 2011) et permet des pertes de poids rapides et importantes. Pour ce faire, les sportifs réduisent leurs apports hydriques et/ou augmentent artificiellement leur sudation, de manière passive (i.e. saunas) et/ou active (i.e. exercice en condition de chaleur) (Filaire et al., 2007; Hall & Lane, 2001; Franchini et al., 2012; Paillard, 2006; Pettersson et al., 2013; Steen & Brownell, 1990; Sundgot-Borgen & Garthe, 2011). A cet effet, les études rapportent que la perte de poids rapide serait majoritairement liée à une perte d'eau (Degoutte et al., 2006; Pettersson & Berg, 2014; Reljic, Hässler, Jost, & Friedmann-Bette, 2013). Cependant, le rétablissement de l'équilibre hydrique et électrolytique est long et, malgré une période de réhydratation après la pesée, le délai ne semble pas suffisant pour restaurer un statut hydrique normal (Paillard, 2006 ; Pettersson & Berg, 2014). Cet état de déshydratation s'avère néfaste à la fois pour le niveau de performance physique et mentale, mais également pour la santé du sportif (Ozkan

& Ibrahim, 2016; Paillard, 2006; Sundgot-Borgen & Garthe, 2011). Ces risques peuvent être exacerbés par l'usage de substances diurétiques rapporté par de nombreuses études (Da Silva Santos et al., 2016; El Ghoch, Soave, Calugi, & Dalle Grave, 2013; Filaire et al., 2007; Steen & Brownell, 1990).

La restriction alimentaire avant la compétition est également un moyen largement utilisé par les sportifs (Artioli, Gualano, et al., 2010; Da Silva Santos et al., 2016; Filaire et al., 2007; Franchini et al., 2012; Pettersson et al., 2012, 2013; Sundgot-Borgen & Garthe, 2011). Les études montrent des réductions de l'ordre de 33 à 53% des apports énergétiques totaux (AET) en comparaison aux apports habituels (Artioli, Gualano, et al., 2010; Da Silva Santos et al., 2016; Degoutte et al., 2006; Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001; Jlid et al., 2013; Reljic et al., 2015; Turocy et al., 2011). La restriction alimentaire s'accompagne d'apports faibles, et parfois insuffisants, en macronutriments (Degoutte et al., 2006; Reljic et al., 2015; Roemmich & Sinning, 1997b), mais également en vitamines et certains minéraux (Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001; Fogelholm et al., 1993; Reljic et al., 2015). Roemmich & Sinning (1997b) ont rapporté que l'apport calorique de jeunes lutteurs américains (15 ans) était inférieur à celui de leurs camarades du même âge, qui ne pratiquaient pas d'activité physique. Cette différence se traduisait par un ralentissement des processus de croissance et de maturation. Ces considérations sur le comportement alimentaire posent une problématique sportive, en matière de performance mais également de santé, au regard des caractéristiques des méthodes employées.

I.3. Les solutions envisagées pour lutter contre ces pratiques

Afin de lutter contre les effets délétères des pratiques de pertes de poids extrêmes, certaines fédérations sportives ont fait évoluer leur réglementation pour permettre un contrôle des variations du poids de corps des sportifs. En 1997, la NCAA (National College Athletic

Association) a intégré un seuil de poids de corps, calculé à partir d'un pourcentage de masse grasse minimal (i.e. 5%) et du poids de corps de pré-saison, en-dessous duquel le sportif ne peut descendre. D'autres réformes, telles qu'un seuil minimal de masse grasse ou un contrôle de la densité urinaire (*Urine Specific Gravity*, USG), pour vérifier le niveau d'hydratation des sportifs, ont également été proposées (Turocy et al., 2011). Depuis 2012, la fédération internationale de judo (IJF) a modifié son règlement pour instaurer la pesée officielle la veille de la compétition, plutôt que le matin du tournoi. Cette modification du règlement avait pour principale motivation de protéger la santé des sportifs en leur évitant d'entamer la compétition dans des états prononcés de déshydratation et/ou de déficit calorique. Néanmoins, pour éviter les dérives, cette réforme s'accompagne d'une pesée supplémentaire et aléatoire le matin de l'épreuve où certains athlètes sont pesés avec une tolérance de poids de corps de 5% par rapport à la limite supérieure de la catégorie (International Judo Federation, 2013). A l'heure actuelle, il n'existe pas d'informations pour connaître l'efficacité de cette mesure sur la santé des judokas. Cependant, si elle a pour vocation de protéger la santé des sportifs, elle questionne sur les valeurs d'équité sportive. Dans des disciplines telles que l'haltérophilie, la stratégie inverse est appliquée avec une période de pesée planifiée deux heures avant le début de la compétition. Finalement, certains auteurs ont envisagé des solutions plus radicales, comme le remplacement des catégories de poids par des catégories de taille (Dubnov-Raz, Mashiach-Arazi, Nouriel, Raz, & Constantini, 2015) ou la classification de la perte de poids comme une pratique dopante (Artioli, Saunders, Iglesias, & Franchini, 2016).

II. INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE SUR LES SYSTEMES PHYSIOLOGIQUES DE REPONSE AU STRESS

Tell me what you eat and I will tell you who you are. Brillat-Savarin (1826)

II.1. Les systèmes physiologiques de réponse au stress

Le fonctionnement et la survie de tout organisme vivant reposent sur sa capacité à maintenir l'équilibre de ses constantes physiologiques dans une zone compatible avec la vie malgré les contraintes de l'environnement. Au début des années 1900, le physiologiste Walter Cannon a appelé ce mécanisme physiologique, *homéostasie*. Dans ce contexte, le stress est considéré comme un état dans lequel l'homéostasie de l'organisme est menacée de manière réelle ou perçue par une contrainte physique et/ou psychologique (Chrousos, 2009; Chrousos & Gold, 1992). Il aboutit à la mise œuvre d'une réponse psychophysiologique, principalement coordonnée par deux systèmes physiologiques, le système sympatho-adreno-médullaire (SAM) et l'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien (HHS) (Chrousos & Gold, 1992). Cette coordination permettrait une régulation temporelle de la réponse au stress, ayant pour objectif de préparer l'organisme à une action rapide, principalement sous l'effet du système SAM, et de permettre une adaptation au stress, par le biais de l'axe HHS (Chrousos & Gold, 1992).

a) Le système sympatho-adreno-médullaire (SAM)

Le système SAM est composé du système nerveux sympathique (SNS) et des surrénales (médullosurrénales). Les surrénales sont des glandes endocrines situées au niveau des reins. La médullosurrénale, située au centre des surrénales, sécrète les catécholamines (i.e. adrénaline, noradrénaline et dopamine) par les cellules chromaffines.

Le système SAM est coordonné au niveau du système nerveux central par le Locus Coeruleus (LC), qui est situé dans le tronc cérébral (Chrousos & Gold, 1992). Le LC stimule la libération de noradrénaline par le système noradrénergique au niveau central, ainsi que la libération de catécholamines, dopamine, adrénaline et noradrénaline, par le SNS et la médullosurrénale. De par sa mobilisation quasi instantanée, il joue un rôle fondamental dans la réponse au stress et permet une réponse rapide (Chrousos & Gold, 1992; Sluiter, Frings-Dresen, Meijman, & van der Beek, 2000). Au niveau du système nerveux central (SNC), la libération de noradrénaline par le réseau neuronal permet une stimulation des fonctions cognitives, se caractérisant par une activation des processus d'éveil et de vigilance, tout en augmentant le niveau d'anxiété (Chrousos & Gold, 1992). Ces adaptations psychophysiologiques ont pour objectif de mettre l'organisme en alerte face à un danger réel, ou perçu comme tel, et de permettre une réponse rapide, se traduisant par un comportement de lutte ou de fuite (*fight or flight response*) (Gold & Chrousos, 2002). Au niveau périphérique, les catécholamines permettent la stimulation et la réorientation des ressources énergétiques, en agissant au niveau cardio-vasculaire et métabolique par l'intermédiaire de leur interaction avec les récepteurs α - et β -adrénergiques membranaires (Chrousos & Gold, 1992). Au niveau du système cardio-vasculaire, les catécholamines provoquent une augmentation de la pression artérielle et de la fréquence cardiaque et contribuent à la réorientation du flux circulatoire en faveur des territoires musculaires mobilisés. En effet, si 80% du volume sanguin est dirigé vers les territoires splanchniques en conditions de repos, en conditions de stress, les catécholamines provoquent une vasoconstriction des vaisseaux splanchniques et une vasodilatation au niveau des territoires musculaires (Ball, 2015). Parallèlement, les catécholamines activent les enzymes de la glycogénolyse (glycogène-phosphorylase) et de la lipolyse (lipase) au niveau musculaire (Ball, 2015; Mora-rodriguez, Hodgkinson, Byerley, & Coyle, 2001; Rabasa & Dickson, 2016). Ce phénomène d'activation est concomitant d'une

inhibition des processus de glycogénèse et de lipogénèse au niveau musculaire et hépatique (Ball, 2015). La modification du flux métabolique, en faveur des processus de dégradation, favorise la libération d'énergie au niveau plasmatique et permet d'épargner les réserves plasmatiques de glucose. L'ensemble de ces réponses physiologiques répond à la nécessité de préparer l'organisme à l'action et d'assurer une fourniture énergétique adéquate pour une réponse efficace au stress (Chrousos, 2009; Gold & Chrousos, 2002).

b) L'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien (HHS)

L'axe HHS est composé de l'hypothalamus et de l'hypophyse, qui se situent dans le système nerveux central, ainsi que des corticosurrénales qui se situent dans les glandes surrénales. Les corticosurrénales sont décomposées en 3 zones, appelées glomérulée, réticulée et fasciculée, à l'intérieur desquelles sont sécrétées les minéralocorticoïdes (zone glomérulée), les glucocorticoïdes (zone fasciculée) et les androgènes stéroïdiens (zone réticulée). Ces 3 zones sont sous le contrôle de l'axe hypothalamo-hypophysaire.

✓ *Le cortisol*

Le cortisol, ou hydrocortisone, est une hormone stéroïdienne qui joue un rôle essentiel dans la réponse au stress, principalement en contribuant à la fourniture énergétique (Hellhammer, Wüst, & Kudielka, 2009). Au niveau plasmatique, le cortisol peut être converti en sa forme inactive, la cortisone, par l'enzyme 11- β Hydroxysteroid-Déshydrogénase 2 (11 β -HSD 2). Cette enzyme se situe principalement au niveau du cortex rénal, du colon et des glandes salivaires. Elle est principalement associée à la présence des récepteurs aux minéralocorticoïdes, pour lesquels le cortisol entre en concurrence avec l'aldostérone. L'inactivation du cortisol en cortisone est un processus permettant de protéger ces tissus d'une hypercortisolémie (i.e. effets anti-aldostérone) (Perogamvros, Ray, & Trainer, 2012).

La 11- β Hydroxysteroid-Déshydrogénase 1 (11 β -HSD 1) est une enzyme catalysant les 2 réactions (cortisol $\leftrightarrow$ cortisone), cependant son action se déroule majoritairement dans le sens d'une conversion de la cortisone en cortisol (Perogamvros et al., 2012). Dans sa forme active, le cortisol est en grande partie (90-95% du cortisol plasmatique total) lié à une molécule de transport, qui peut être la Corticosteroid Binding Globulin (CBG) (pour 80% du cortisol total), ou l'albumine (pour 10 à 15% du cortisol total). Seule la fraction libre du cortisol, c'est-à-dire qui n'est pas liée à une molécule de transport, a la capacité de franchir la membrane cellulaire et de se lier aux récepteurs de glucocorticoïdes (GC), qui se situent au niveau cytoplasmique. L'action de l'enzyme 11 β -HSD, ainsi que des molécules de transport (i.e. CBG et albumine) contribuent à réguler la biodisponibilité du cortisol pour les récepteurs aux GC, et par conséquent son activité au niveau tissulaire (Perogamvros et al., 2012). Par ailleurs, l'augmentation de la concentration plasmatique du cortisol a été associée à une augmentation parallèle de la concentration plasmatique de la cortisone, probablement sous l'effet d'une augmentation de l'activité enzymatique de 11 β -HSD 2. Ce phénomène constituerait un mécanisme de protection contre les effets physiologiques délétères d'une hypercortisolémie (Weber et al., 2000). Enfin, les hormones stéroïdiennes ne pouvant être stockées, l'association avec une protéine de liaison apparaît comme une forme de stockage plasmatique (Vingren et al., 2010). La CBG représenterait donc une forme de stockage du cortisol, assurant une libération localisée, notamment dans le cas de certaines réactions inflammatoires (Perogamvros et al., 2012).

Le cortisol a une action physiologique au niveau du système métabolique, du système immunitaire, ainsi que des processus inflammatoires et de croissance (Perogamvros et al., 2012; Rabasa & Dickson, 2016). Au niveau métabolique, le cortisol a un rôle hyperglycémiant. L'association du cortisol avec son récepteur stimule les mécanismes cataboliques au niveau cellulaire, favorisant la libération d'énergie au niveau plasmatique. Ce

phénomène se traduit par une stimulation de la glycogénolyse au niveau musculaire, de la lipolyse au niveau musculaire et adipeux, et des réactions de protéolyse au niveau des cellules musculaires (Djurhuus et al., 2002; Rabasa & Dickson, 2016). Ces processus permettent la libération d'acides gras libres et d'acides aminés au niveau plasmatique qui serviront à la régulation de la glycémie, notamment par le biais de la néoglucogenèse au niveau hépatique (Djurhuus et al., 2002; Kraemer & Ratamess, 2005; Rabasa & Dickson, 2016; Viru & Viru, 2004). Le cortisol possède une action anti-inflammatoire en réduisant la libération de facteurs chimiques pro-inflammatoires (prostaglandines et leucotriènes). Au-delà de son influence sur le plan métabolique, l'axe HHS est également impliqué dans la régulation de la balance énergétique. La diminution de la glycémie, associée à la baisse de la concentration plasmatique de la leptine, hormone anorexigène, sont des signaux stimulant le noyau arqué de l'hypothalamus. Ce phénomène se traduit par la libération de *Corticotropin Releasing Hormone* (CRH), par les noyaux paraventriculaires de l'hypothalamus, qui va activer l'axe HHS et la sécrétion du cortisol par la glande surrénale (Nieuwenhuizen & Rutters, 2008). Par ailleurs, le cortisol stimule la libération du neuropeptide Y (NPY), qui est un neurotransmetteur présentant une action orexigène, tout en diminuant la sensibilité cellulaire à la leptine et à l'insuline. Ces modifications physiologiques conduisent à la stimulation de la prise alimentaire, ainsi qu'à l'activation des processus de synthèse de glucose, par le biais de la néoglucogenèse, et l'inhibition des mécanismes d'absorption du glucose au niveau intracellulaire (Nieuwenhuizen & Rutters, 2008). La stimulation de la prise alimentaire et les adaptations métaboliques, induites par le cortisol, ont pour objectif de préserver l'homéostasie énergétique.

La cortisolémie suit un rythme circadien, avec des valeurs maximales (acrophase) au réveil avant de diminuer progressivement pour atteindre un niveau minimal au coucher (nadir) (Ghiciuc et al., 2011; Matsuda, Yamaguchi, Okada, Gotouda, & Mikami, 2012; Weber et al.,

2000; Wilcox, Granger, Szanton, & Clark, 2014). Cependant, au cours des 30 à 45 minutes suivant le réveil, une phase spécifique du rythme circadien a été observée. Cette phase, appelée *Cortisol Awakening Response* (CAR), est caractérisée par une augmentation des concentrations salivaires du cortisol de l'ordre de 50 à 75% des valeurs de réveil (Pruessner et al., 1997). L'augmentation moyenne des concentrations salivaires du cortisol post-réveil rapportée dans la littérature représente une variation de $9.3 \pm 3.1 \text{ nmol.l}^{-1}$, soit une augmentation de l'ordre de $91.1 \pm 42.4\%$ comparativement aux valeurs de réveil (Clow, Thorn, Evans, & Hucklebridge, 2004). Ce phénomène est observé chez 75% des individus sains (Fries, Dettenborn, & Kirschbaum, 2009). Cette phase, distincte du rythme circadien, représente le processus de transition veille-sommeil sous le contrôle de l'hippocampe et des noyaux suprachiasmatiques (NSC) (Clow, Hucklebridge, Stalder, Evans, & Thorn, 2010; Fries et al., 2009). L'hippocampe est une région du cerveau majoritairement impliquée dans les processus de mémorisation. Il inhiberait l'activité des NSC au cours de la phase précédant le réveil (Clow et al., 2010; Fries et al., 2009). Les NSC sont directement liés à la zone fasciculée des glandes surrénales par l'intermédiaire des nerfs splanchniques, sous la commande du Locus Coeruleus. Après la phase de réveil, la baisse de l'activité de l'hippocampe, ainsi que la stimulation du nerf optique par la lumière activeraient les NSC. L'activation des NSC permettrait la stimulation de la voie extra-pituitaire, favorisant la libération du cortisol en augmentant la sensibilité de la zone fasciculée à l'ACTH (Clow et al., 2010; Smyth, Hucklebridge, Thorn, Evans, & Clow, 2013). Bien que son rôle soit encore discuté, le CAR permettrait de préparer l'organisme aux contraintes de la journée à venir, tant d'un point de vue cognitif en facilitant les processus d'éveil et de vigilance, que d'un point de vue métabolique en favorisant la mobilisation des ressources énergétiques (Clow et al., 2010; Fries et al., 2009). Dans cette perspective, il a été observé que les valeurs du CAR étaient supérieures lors des jours de travail en comparaison aux jours de repos (Kunz-Ebrecht,

Kirschbaum, Marmot, & Steptoe, 2004). Cependant, les contraintes du jour précédent, et notamment les expériences négatives, pourraient également avoir une influence sur le CAR (Smyth et al., 2013). La réponse du cortisol au stress du réveil a été proposée comme un indicateur fiable de l'activité de l'axe HHS (Clow et al., 2010; Fries et al., 2009; Smyth et al., 2013). Il a également été suggéré que les variations circadiennes du cortisol, dont le CAR, auraient un rôle d'horloge biologique pour certains organes, l'augmentation de la stimulation par le cortisol reflétant l'alternance jour/nuit (Smyth et al., 2013). Cependant, la mesure du CAR nécessite des précautions et une standardisation du protocole de prélèvement, notamment au regard de l'heure de lever et des modalités du réveil (Clow et al., 2004).

✓ *La déhydroépiandrostérone (DHEA)*

La déhydroépiandrostérone (DHEA) est un androgène stéroïdien qui est synthétisée au niveau de la zone réticulée des corticosurrénales à partir de la prégnénolone, qui est une molécule dérivée du cholestérol. Une partie de la DHEA est convertie en DHEA-Sulfate (DHEAS) au niveau surrénalien par l'enzyme DHEA sulfotransférase. La DHEAS est un ester plus stable et représente une forme de stockage de la DHEA. La DHEA et la DHEAS sont les hormones stéroïdiennes les plus abondantes dans le corps humain (Maninger, Wolkowitz, Reus, Epel, & Mellon, 2009; Pluchino, Drakopoulos, Wenger, Petignat, & Genazzani, 2015). Bien que la concentration plasmatique de la DHEAS soit 250 fois supérieure à celle de la DHEA, le ratio entre la concentration salivaire et la concentration plasmatique est supérieur pour la DHEA (5%) comparativement à la DHEAS (0,1%) (Vining, McGinley, & Symons, 1983). Au niveau cellulaire, la DHEA et la DHEAS se lient à un récepteur cytoplasmique avant de pénétrer dans le noyau cellulaire pour modifier l'activité de transcription de l'ADN (Maninger et al., 2009). La DHEA et la DHEAS jouent un rôle androgénique, en influençant le développement des caractères sexuels secondaires, et anabolique en stimulant la synthèse du glycogène et des protéines musculaires (Maninger et al., 2009). Une partie des effets physiologiques de la

DHEA et de la DHEAS est également permise par la conversion en ses métabolites stéroïdiens, qui sont la testostérone et l'œstradiol, et qui possèdent une action physiologique plus puissante que la DHEA (Maninger et al., 2009 ; Pluchino et al., 2015). La DHEA et la DHEAS ont un impact sur l'humeur et la protection des structures cérébrales. Les concentrations plasmatiques de la DHEA ont été corrélées positivement et significativement à l'humeur (Pluchino et al., 2015). De plus, l'augmentation des concentrations de la DHEA a été associée à un phénomène de résilience au stress, témoignant d'une adaptation positive à la situation (Boudarène, Legros, & Timsit-Berthier, 2002; Pluchino et al., 2015; Zarit et al., 2014). La DHEA est aussi synthétisée au niveau du SNC, où elle présente l'action d'un neurostéroïde, avec des concentrations supérieures aux valeurs plasmatiques (Maninger et al., 2009). L'influence positive de la DHEA et de la DHEAS sur les fonctions cognitives serait liée à (1) la protection et la stimulation des processus de croissance au niveau des structures neuronales (Maninger et al., 2009) et, (2) à son effet « anti-cortisol » (Boudarène et al., 2002 ; Zarit et al., 2014). En effet, la DHEA aurait un impact sur la synthèse des enzymes 11 β -HSD 1 et 11 β -HSD 2, qui contrôlent les réactions de conversion du cortisol en cortisone (i.e. 11 β -HSD 2), et inversement (i.e. 11 β -HSD 1). Des études réalisées chez le rat ont observé que la complémentation en DHEA entraînait une augmentation de l'expression de l'ARNm de l'enzyme 11 β -HSD 2 et une diminution de l'expression de l'ARNm de l'enzyme 11 β -HSD 1 (Maninger et al., 2009). De ce fait, la DHEA favoriserait l'inactivation du cortisol en cortisone. D'autre part, la DHEA et la DHEAS inhiberaient la translocation de l'association Cortisol-Récepteur dans le noyau, et par conséquent, l'impact physiologique de l'hormone au niveau cellulaire (Maninger et al., 2009). Chez l'Homme, le rôle anti-cortisol de la DHEA a également été mis en lumière dans le cadre des processus de vieillissement. Durant cette phase, une altération sélective de la zone réticulée de la glande surrénale provoque une diminution de la production de la DHEA et de la DHEAS. Ce phénomène modifie l'équilibre

entre la production des glucocorticoïdes et de la DHEA et DHEAS, en faveur des GC, ce qui favoriserait l'altération des fonctions cognitives observée chez les personnes âgées (Pluchino et al., 2015).

Les concentrations plasmatiques de la DHEA et de la DHEAS présentent un rythme circadien similaire à celui du cortisol, avec une diminution progressive au cours de la journée (Ghiciuc et al., 2011; Oskis, Clow, Thorn, Loveday, & Hucklebridge, 2012; Wilcox et al., 2014; Zarit et al., 2014). Inversement au cortisol, la réponse de la DHEA au réveil est caractérisée par une diminution de sa concentration (Ghiciuc et al., 2011; Oskis, Clow, et al., 2012; Wilcox et al., 2014).

L'homéostasie du cortisol et de la DHEA est régulée par une boucle de rétroaction négative au niveau de l'axe hypothalamo-hypophysaire ; l'augmentation de la concentration plasmatique de l'hormone inhibant la libération de CRH et d'ACTH, réduisant de ce fait la stimulation du cortex surrénalien. En plus de cette voie de régulation directe, la sécrétion du cortisol est sous le contrôle d'une voie extra-pituitaire. La zone fasciculée est spécifiquement innervée par le système nerveux autonome (i.e. nerfs splanchniques) sous la commande directe des NSC (Edwards & Jones, 1993). Certains auteurs ont proposé que la différence entre les réponses au réveil du cortisol et de la DHEA serait la conséquence de cette double régulation de la zone fasciculée (Clow et al., 2010; Oskis, Clow, et al., 2012).

c) Comment évaluer l'activité de ces systèmes physiologiques ?

✓ *Les prélèvements salivaires*

Depuis 40 ans, l'utilisation des prélèvements salivaires s'est avérée être une alternative aux prélèvements sanguins (Gröschl, 2008). La salive est un liquide produit au niveau de la cavité buccale, composée à 98% d'eau et contenant des hormones, des peptides, des électrolytes, des

agents antibactériens et diverses enzymes. Elle joue un rôle important dans certaines fonctions organiques, telles que la digestion et les défenses immunitaires (Gröschl, 2008). La production de salive est assurée par 3 glandes salivaires majeures, la glande parotide, la glande submandibulaire et la glande sublinguale, toutes innervées par le système nerveux autonome (SNA), à savoir le système nerveux sympathique (SNS) et le système nerveux parasympathique (SNP). La sécrétion salivaire est la résultante de l'action coordonnée du SNS et du SNP. La stimulation par le SNP entraîne une sécrétion salivaire riche en eau et faible en composés organiques et inorganiques. Inversement, la stimulation par le SNS provoque une sécrétion salivaire riche en composés organiques et inorganiques (Papacosta & Nassis, 2011).

Le passage des hormones du compartiment sanguin au compartiment salivaire se déroule de 2 manières qui sont dépendantes des caractéristiques de l'hormone. Les hormones liposolubles et non-conjuguées, comme le cortisol ou la testostérone, diffusent par une voie intracellulaire au niveau des glandes salivaires (Gröschl, 2008). Seule la fraction libre des hormones stéroïdiennes, c'est-à-dire non liée à des protéines de transport, peut pénétrer dans le compartiment salivaire. Les hormones stéroïdiennes non-liposolubles et conjuguées à des molécules de transport comme la DHEAS ont une diffusion par ultrafiltration, caractérisée par un passage à travers les jonctions étroites des acini. Ce mode de diffusion limite considérablement le passage au niveau du compartiment salivaire et se traduit par un ratio $\frac{Sang}{Salive}$ très élevé, ce qui explique la différence observée entre le ratio de la DHEA et celui de la DHEAS (Vining et al., 1983). De plus, la diffusion des hormones non-liposolubles et conjuguées se trouve dépendante du taux de salivation, contrairement aux hormones liposolubles et non-conjuguées (Vining et al., 1983). Enfin, les prélèvements salivaires ont l'avantage d'être non-invasifs, tout en permettant une évaluation fiable de certains marqueurs biologiques comparativement au compartiment sanguin (Gatti & De Palo, 2011; Gröschl,

2008; Papacosta & Nassis, 2011; Smyth et al., 2013). Ces caractéristiques permettent des prélèvements rapides, fréquents et sans occasionner de stress (Gröschl, 2008 ; Papacosta & Nassis, 2011), ce qui est un avantage majeur au regard de l'influence des phénomènes d'anticipation psychologique sur les réponses hormonales, notamment celles du cortisol (Alix-Sy, Le Scanff, & Filaire, 2008; Passelergue & Lac, 1999).

✓ *Quels sont les indicateurs salivaires ?*

Les catécholamines sont présentes au niveau salivaire, cependant les faibles concentrations salivaires, ainsi que leur vitesse de dégradation élevée, n'en font pas un indicateur fiable de l'activité adrénergique (Gröschl, 2008). Chatterton et al. (1996) ont montré que la mesure de l'activité de l' α -amylase salivaire représentait un indicateur de l'activité du SAM. L' α -amylase est l'une des plus importantes enzymes salivaires, majoritairement sécrétée par la glande parotide (80%) (Zakowski & Bruns, 1985). Son rôle consiste en l'hydrolyse des molécules d'amidon en maltose, participant à l'étape initiale de la digestion. Elle présente également une action immunitaire en jouant une fonction antibactérienne au niveau de la cavité buccale (Nater & Rohleder, 2009). Les premiers travaux menés sur le lien entre l'activité de l' α -amylase salivaire et les catécholamines plasmatiques ont permis d'observer des corrélations significatives, notamment avec la noradrénaline dans des conditions de stress physiologiques (Chatterton, Vogelsong, Lu, Ellman, & Hudgens, 1996). Cependant, certains auteurs ont fait remarquer que les corrélations observées dans les travaux de Chatterton et al. (1996) n'étaient pas significatives dans le cadre d'un stress psychologique ($r = 0.17$) (Nater & Rohleder, 2009). Récemment, des corrélations non significatives entre les concentrations plasmatiques de noradrénaline et l'activité de l' α -amylase salivaire, à la suite d'un test de stress en laboratoire (*Trier Social Stress Test*, TSST), ont été constatées (Petrakova et al., 2015). Le mode de recueil des échantillons salivaires (salivation stimulée) pourrait expliquer l'absence de corrélation. D'autres études ont permis de rapporter des corrélations

significatives entre l'activité de l' α -amylase salivaire et des indicateurs indirects de l'activité du SNA, tels que les paramètres cardio-vasculaires (Nater & Rohleder, 2009; Rohleder & Nater, 2009; Schumacher, Kirschbaum, Fydrich, & Ströhle, 2013) et métaboliques (i.e. lactate) (Bocanegra, Diaz, Teixeira, Soares, & Espindola, 2012). L'ensemble de ces résultats a permis de montrer que l'activité de l' α -amylase salivaire constituait un marqueur fiable du système SAM (Nater & Rohleder, 2009; Schumacher et al., 2013; Takai et al., 2004).

L' α -amylase salivaire présente également un rythme circadien, avec des valeurs supérieures en fin de journée en comparaison à celles du matin (Ghiciuc et al., 2011; Rohleder & Nater, 2009; Wilcox et al., 2014). A l'instar du cortisol, l' α -amylase salivaire présente une réponse au stress du réveil, mais avec une cinétique opposée et caractérisée par une diminution de l'activité enzymatique dans les 30-60 minutes suivant le réveil (Ghiciuc et al., 2011; Wilcox et al., 2014).

Les concentrations salivaires du cortisol et de la DHEA ont été décrites comme des indicateurs fiables de l'activité de l'axe HHS (Hellhammer et al., 2009) et ont été significativement et positivement corrélées aux concentrations plasmatiques (Lac, Lac, & Robert, 1993; Petrakova et al., 2015; Smyth et al., 2013; Vining et al., 1983). De plus, comme indiqué précédemment, la mesure des concentrations salivaires du cortisol et de la DHEA est indépendante du taux de salivation (Vining et al., 1983). Cependant, le compartiment salivaire est caractérisé par la présence de l'enzyme 11 β -HSD 2, pouvant entraîner une sous-estimation des concentrations salivaires du cortisol (Gröschl, 2008). Néanmoins, les avantages conférés par les prélèvements salivaires, ainsi que la possibilité de mesurer directement la fraction biologiquement active de l'hormone, sont des atouts incontestables dans les études portant sur la réponse de l'axe HHS au stress.

✓ *Comment calculer les réponses physiologiques ?*

Les échantillons salivaires favorisent des points de mesure multiples, indispensables à une observation précise du rythme circadien d'un système physiologique (Ghiciuc et al., 2011). La mesure du rythme circadien nécessite 5 à 6 points d'évaluation étalés sur la journée, généralement au réveil, à 11h, 14h, 17h et au moment du coucher. Sur la base de ces points de mesure, Pruessner et al. (2003) ont proposé le calcul de l'aire sous la courbe, appelée *Area Under the Curve in reference to the ground* (AUCg), permettant de prendre en considération les variations des concentrations hormonales par rapport au temps et à l'amplitude. La valeur de l'AUCg reflète la sécrétion hormonale globale sur la période observée et permettrait de comparer, au-delà des simples points de mesure, la variabilité du rythme circadien de manière longitudinale (Clow et al., 2004; Pruessner, Kirschbaum, Meinlschmid, & Hellhammer, 2003).

La réponse au réveil est calculée sur la base d'un point de prélèvement au réveil, puis 30, 45, voire 60 minutes après le réveil (Clow et al., 2004). A partir de ces éléments, 3 méthodes ont été définies pour calculer la réponse au réveil (Clow et al., 2004) :

1. L'augmentation moyenne ou *Mean Increase*. Elle correspond à la valeur moyenne des points post-réveil, à laquelle il faut soustraire la valeur de réveil (Wüst, Federenko, Hellhammer, & Kirschbaum, 2000).
2. La méthode du calcul de l'aire sous la courbe. Pruessner et al. (2003) distinguent la valeur de l'AUCg, qui correspond à l'aire sous la courbe en prenant l'axe des abscisses comme référence, et la valeur de l'AUCi, qui correspond au même calcul en prenant la valeur de réveil comme référence. Les auteurs ont proposé l'utilisation de l'AUCg en tant qu'indicateur de la production hormonale globale, permettant de distinguer une variation de la sécrétion hormonale (Pruessner et al., 2003). La valeur de l'AUCi, *Area Under the Curve in reference to the increase*, représente la variation des concentrations hormonales en prenant en

considération la valeur initiale (i.e. la valeur de réveil). Elle serait donc un témoin de la réactivité et de la sensibilité du système physiologique observé (Clow et al., 2004; Pruessner et al., 2003).

3. La méthode du *delta score*. D'autres auteurs ont utilisé la différence entre la valeur de réveil et la valeur mesurée 30 minutes post-réveil, ou la valeur maximale post-réveil, si plus de 2 points de mesure ont été effectués (Filaire, Ferreira, Oliveira, & Massart, 2013; Filaire et al., 2015; Kunz-Ebrecht et al., 2004; Spiegel, Giese-Davis, Barr Taylor, & Kraemer, 2006; Tomiyama et al., 2010). Cette méthode est considérée comme la plus simple pour évaluer la réponse au stress (Rohleder & Nater, 2009).

La fiabilité de la mesure des réponses au réveil nécessite des précautions quant aux modalités du prélèvement, notamment l'importance de l'immédiateté du prélèvement au moment du réveil, ainsi que la standardisation des conditions de sommeil et de réveil (Clow et al., 2004).

Les réponses physiologiques au réveil ont été principalement utilisées pour observer d'éventuels dysfonctionnements dans l'activité des systèmes physiologiques de stress, potentiellement en lien avec des troubles psychopathologiques (Clow et al., 2010, 2004; Filaire et al., 2015; Fries et al., 2009; Huber, Issa, Schik, & Wolf, 2006; Monteleone et al., 2011; Oskis, Loveday, Hucklebridge, Thorn, et al., 2012; Oskis, Loveday, Hucklebridge, Wood, et al., 2012; Pruessner, Hellhammer, & Kirschbaum, 1999; Smyth et al., 2013; Zarit et al., 2014). D'autres études ont utilisé la réponse des indicateurs salivaires à des situations de stress d'ordre psychologique, telles que le TSST (Engert et al., 2011; Hua et al., 2014; Laurent, Powers, & Granger, 2013; Petrakova et al., 2015; Spiegel et al., 2006), et/ou physique comme l'exercice (Alix-Sy et al., 2008; Chennaoui et al., 2016; Chiodo et al., 2011; Crewther, Cook, Lowe, Weatherby, & Gill, 2011; Crewther, Heke, & Keogh, 2011; Kivlighan & Granger, 2006; Le Panse et al., 2010, 2012; Moreira et al., 2013; Passelergue & Lac, 1999;

Passelergue, Robert, & Lac, 1995). Dans ce cadre, les mesures sont réalisées avant, tout de suite après la sollicitation, ainsi que dans les minutes/heures qui suivent la fin de la situation afin d'évaluer la cinétique de la récupération. Dans cette perspective, le calcul des réponses physiologiques peut se baser sur le delta entre les valeurs pré et post-exercice et/ou sur le calcul de l'AUCg.

✓ *Quel mode de prélèvement ?*

Le prélèvement par salivette et par salivation dans un tube approprié (*passive drooling*, en anglais) sont les 2 principaux modes de recueil des échantillons salivaires. La salivette est un matériel en coton, polyester ou polyéthylène permettant de prélever de la salive directement dans la cavité buccale. Le mode par salivation se réalise avec le participant salivant dans un tube Eppendorf. Il permet de recueillir un échantillon de salive représentant la sécrétion des 3 glandes salivaires majeures (Rohleder & Nater, 2009). Le recueil par salivette présente l'avantage de minimiser le risque de contamination par saignement des gencives et d'être une méthode plus « propre » que la salivation, et par conséquent plus facilement acceptée par les participants (Gröschl, 2008; Rohleder & Nater, 2009; Papacosta & Nassis, 2011). Cependant, l'utilisation d'un matériel en coton ou en polyester fausserait les résultats de par son impact sur l'acidité du milieu (Papacosta & Nassis, 2011). De plus, l'utilisation de la salivette nécessite des précautions particulières. La mastication ou non du morceau de coton, ainsi que son placement dans la cavité buccale, doivent être standardisés car ils sont susceptibles d'influer sur les résultats (Rohleder & Nater, 2009; Papacosta & Nassis, 2011). De ce fait, le recueil par salivation est considéré comme la méthode de prélèvement la plus fiable (Booij, Bos, Bouwmans, & Faassen, 2015; Papacosta & Nassis, 2011).

Les modalités de recueil par salivation stimulée et non stimulée ont été proposées dans le cadre des prélèvements par salivation. La stimulation de la salivation se fait par le biais d'un stimulus chimique (acide citrique) ou mécanique (mastication d'un chewing-gum) et permet

d'induire des sécrétions de salive de l'ordre de 5 à 10 ml.min⁻¹ (Gröschl, 2008). La méthode non-stimulée nécessite que le sujet laisse la salive s'accumuler progressivement dans la bouche. Cette dernière méthode est considérée comme la méthode de référence car, la stimulation de la salivation semble interférer avec l'analyse des résultats de par l'impact de l'acide citrique sur le pH (Gröschl, 2008). De plus, l'action de mastication provoque une modification de la contribution des différentes glandes salivaires à la production de salive (Papacosta & Nassis, 2011; Rohleder & Nater, 2009). Or, la stimulation de la salivation augmente la contribution de la glande parotide à la production salivaire, pouvant induire une modification des valeurs de l' α -amylase (Rohleder & Nater, 2009).

✓ *Les consignes à respecter*

Au regard de l'influence des aliments et des boissons, notamment les sodas et la caféine, sur l'acidité salivaire et la fiabilité des résultats, les auteurs préconisent de ne pas manger, ni de boire entre 30 et 120 minutes avant le prélèvement (Gatti & de Palo, 2011; Papacosta & Nassis, 2011; Rohleder & Nater, 2009). La consommation d'alcool est prohibée dans les 24 heures précédant le recueil de salive (Papacosta & Nassis, 2011). Enfin, et comme indiqué précédemment, la contamination de l'échantillon salivaire par des traces de sang est préjudiciable à la fiabilité des résultats. De ce fait, il est indispensable de vérifier que le participant n'a pas subi d'interventions dentaires dans les 48 heures avant le prélèvement, ni ne s'est brossé les dents dans l'heure qui précède le recueil de l'échantillon. L'évaluation visuelle d'éventuelles traces de sang permet une discrimination des échantillons salivaires contaminés (Papacosta & Nassis, 2011).

Lorsque les prélèvements sont réalisés par la méthode de *passive drooling*, il est demandé au participant de se rincer la bouche 10 minutes avant le recueil de l'échantillon et d'avaler la première quantité de salive accumulée (Gatti & de Palo, 2011; Papacosta & Nassis, 2011). La durée du prélèvement doit être mesurée afin de pouvoir déterminer le taux de salivation, il

doit être compris entre 2 et 5 minutes (Rohleder & Nater, 2009). Enfin, il est indispensable de standardiser les horaires de prélèvement pour éviter l'influence du rythme circadien sur les résultats (Gröschl, 2008). Une fois le prélèvement effectué, l'échantillon salivaire doit être refroidi aussi vite que possible (Papacosta & Nassis, 2011).

II.2. **Réponses des systèmes physiologiques du stress**

a) La réponse au stress, une coordination des 2 axes

La réponse physiologique au stress est caractérisée par la stimulation des processus cognitifs d'éveil, de vigilance et d'attention, ainsi que des mécanismes physiologiques favorisant la mobilisation des ressources énergétiques, dans la perspective de mettre en œuvre des comportements de fuite ou de lutte. Ces réponses adaptatives au stress sont concomitantes d'une inhibition des fonctions non-essentielles à la survie de l'organisme dans un contexte de stress, telles que le comportement alimentaire et sexuel, ainsi que les mécanismes de croissance (Chrousos & Gold, 1992; Gold & Chrousos, 2002). Cependant, ces adaptations psychophysiologiques sont censées être proportionnées en ampleur et en durée par rapport à la contrainte environnementale.

De nombreuses études ont décrit la réponse au stress comme la résultante d'une coordination entre l'axe HHS et le système SAM (Ali & Pruessner, 2012; Chrousos, 2009; Chrousos & Gold, 1992; Gold & Chrousos, 2002; McEwen, 1998; Sapolsky, Romero, & Munck, 2000). La réponse à une contrainte d'ordre psychologique ou physique semble se traduire par une augmentation des concentrations salivaires du cortisol et de l' α -amylase et/ou des réponses au réveil (Chatterton et al., 1996; Chiodo et al., 2011; Engert et al., 2011; Filaire, Alix, Ferrand, & Verger, 2009; Hua et al., 2014; Kunz-Ebrecht et al., 2004; Laurent et al., 2013; Takai et al., 2004), traduisant l'implication commune des 2 systèmes physiologiques. Néanmoins, il

semblerait qu'il existe un décalage dans la réactivité des 2 systèmes. Le système SAM présenterait une réponse immédiate à l'agent stressant, alors que la réponse l'axe HHS serait retardée, mais aussi plus durable (Engert et al., 2011; Hua et al., 2014; Takai et al., 2004). Engert et al. (2011) ont observé des corrélations dans la synchronisation temporelle de la variation des 2 indicateurs ; l'activité de l' α -amylase salivaire permettant de prédire les concentrations salivaires du cortisol dans les 5-24 minutes suivantes. De la même manière, la concentration salivaire du cortisol était négativement corrélée avec l'activité de l' α -amylase salivaire pour les 4-28 minutes suivantes. Ces résultats tendraient à confirmer les interactions existant entre les 2 systèmes. L'activation du système SAM stimulerait l'activité de l'axe HHS, alors que le cortisol jouerait un rôle inhibiteur sur l'activation du système SAM, probablement par l'intermédiaire de son action sur le LC (Engert et al., 2011). Laurent et al. (2013) ont également observé une synchronisation temporelle dans la réponse des 2 systèmes. Le délai nécessaire à la diffusion du cortisol dans le compartiment salivaire pourrait également expliquer les décalages temporels observés dans ces études (Takai et al., 2004).

De nombreuses études ont aussi rapporté l'influence du contexte sur les réponses du cortisol. Les phénomènes d'anticipation d'un évènement provoqueraient une augmentation des concentrations salivaires du cortisol en l'absence même d'agent stressant (Alix-Sy et al., 2008; Filaire, Maso, Sagnol, Ferrand, & Lac, 2001; Filaire, Sagnol, Ferrand, Maso, & Lac, 2001; Passelergue & Lac, 1999). De la même manière, les modalités d'une épreuve compétitive (amicale vs officielle), ainsi que son niveau (match de poules vs finale) sont également des facteurs favorisant l'augmentation des concentrations salivaires du cortisol (Crewther, Heke, et al., 2011; Filaire, Sagnol, et al., 2001; Moreira et al., 2013; Passelergue et al., 1995). L'engagement actif de l'individu dans la tâche, l'absence ou le manque de contrôle et l'évaluation sociale ont été décrits comme les facteurs majeurs de la réponse aigüe du cortisol (Hua et al., 2014 ; Smyth et al., 2013).

D'autres auteurs ont proposé que la coordination des 2 systèmes serait basée sur un mécanisme compensatoire, où l'hypoactivité d'un système stimulerait l'activité du second (Ali & Pruessner, 2012; Chennaoui et al., 2016; McEwen, 1998). De ce fait, la mesure du ratio $\alpha\text{-amylase}/\text{Cortisol}$, appelé *Amylase Over Cortisol ratio* (AOC) et basé sur les valeurs de l'AUCg, a été préconisée comme un marqueur de la coordination des 2 systèmes (Ali & Pruessner, 2012; Filaire et al., 2013).

b) Dysfonctionnement des systèmes physiologiques en réponse au stress

Si la réponse au stress est un mécanisme indispensable à la survie de l'organisme, l'exposition chronique à une situation de stress peut altérer l'activité des systèmes physiologiques du stress (i.e. hypo- ou hyperactivité) (Chrousos & Gold, 1992; McEwen, 1998; Yehuda, Resnick, Kahana, & Giller, 1993). Ce phénomène a été associé à la physiopathologie des troubles de la personnalité, ainsi qu'à des syndromes de fatigue et/ou d'épuisement, conséquents d'une contrainte physique et/ou psychologique durable (Ali & Pruessner, 2012; Booij et al., 2015; Chrousos & Gold, 1992; Clow et al., 2010, 2004, Filaire et al., 2013, 2015; Hua et al., 2014; Huber et al., 2006; McEwen, 1998; Monteleone et al., 2011; Nater et al., 2010; Pruessner et al., 1999; Spiegel et al., 2006; Van Voorhees, Dennis, Calhoun, & Beckham, 2014; Yehuda et al., 1993; Yoon & Weierich, 2016). Les facteurs génétiques mais également environnementaux, comme la nutrition, ont une influence pouvant majorer ou minorer ces réponses adaptatives (Chrousos & Kino, 2009; McEwen, 1998).

✓ La réponse du cortisol au stress chronique

Les études sur les concentrations salivaires du cortisol en réponse à une période de stress ont montré des résultats divergents. Un stress chronique a été associé à une réduction du CAR et/ou de la concentration salivaire du cortisol (Filaire et al., 2013; Huber et al., 2006; Nater et

al., 2010; Pruessner et al., 1999; Yehuda et al., 1993). De la même manière, certaines études ont rapporté une atténuation, voire une suppression, de la réponse du cortisol à une situation de stress psychologique aigu (TSST) chez des patients souffrant de stress chronique (Ali & Pruessner, 2012; Spiegel et al., 2006). Un constat similaire a été rapporté chez des sujets soumis à la description d'un événement personnel traumatisant (Yoon & Wieirich, 2016). Ces résultats pourraient traduire un épuisement de l'axe HHS, conduisant à une baisse de la sécrétion du cortisol et/ou une réduction de la sensibilité du cortex surrénalien à l'ACTH (Nater et al., 2010; Pruessner et al., 1999; Yehuda et al., 1993). La diminution de la sécrétion du cortisol provoque une baisse de la libération des cytokines anti-inflammatoires facilitant le développement de syndromes inflammatoires et de maladies auto-immunes (Chrousos & Gold, 1992; McEwen, 1998). De plus, elle est associée à une diminution de la sensibilité au stress, qui peut se traduire par une modification du comportement alimentaire, dans le sens d'une hyperphagie (Chrousos, 2009).

Cependant, d'autres études ont observé une augmentation du CAR, ou de la concentration plasmatique ou salivaire du cortisol, chez des sujets soumis à des conditions de stress chronique (Schulz, Kirschbaum, Pruessner, & Hellhammer, 1998; Spiegel et al., 2006; Van Voorhees et al., 2014; Weber et al., 2000). L'hyperactivité de l'axe HHS constatée dans ces études pourrait être la conséquence d'une diminution de la sensibilité de l'axe hypothalamo-hypophysaire aux feedbacks négatifs du cortisol, limitant la régulation de la cortisolémie (Spiegel et al., 2006). Une sécrétion excessive et chronique du cortisol (i.e. hypercortisolémie) est toxique pour l'organisme (Yehuda et al., 1993). Au niveau du SNC, elle peut provoquer une atrophie de l'hippocampe, se traduisant par une altération des processus de mémorisation à court terme et de la perception des situations de stress. Ce phénomène accentuerait la sensibilité au stress et renforcerait la stimulation de l'axe HHS (McEwen, 1998). Sur le plan métabolique, elle induit une baisse de la sensibilité tissulaire à

l'insuline (i.e. phénomène d'insulino-résistance) et favorise l'accumulation de graisses au niveau viscéral. L'altération de ces paramètres métaboliques contribue au développement de maladies cardio-vasculaires (Chrousos, 2009; McEwen, 1998; Nieuwenhuizen & Rutters, 2008). Enfin, une hypercortisolémie entraîne un état d'immunodéficience, favorable à l'apparition d'infections (McEwen, 1998).

L'influence du stress sur l'axe HHS serait dépendante de l'interaction de plusieurs facteurs, dont la nature du stress, mais également des précédentes expériences vécues par l'individu (Yehuda et al., 1993). Les modalités de mesure (réponses au réveil ou à une situation de stress) pourraient également influencer les résultats, ainsi que leur interprétation (Spiegel et al., 2006). Quelque soit l'orientation de la modification de l'activité de l'axe HHS (i.e. hypo- ou hyperactivité), Pruessner et ses collaborateurs (1999) ont proposé que la modification de ce paramètre serait, en soit, l'indicateur d'un dysfonctionnement physiologique.

✓ *La réponse de la DHEA au stress chronique*

Les études portant sur l'influence du stress chronique sur les concentrations salivaires et/ou plasmatiques de la DHEA et de la DHEAS ont abouti à des résultats peu consensuels. Certains auteurs ont montré que l'évolution des concentrations plasmatiques de la DHEA et du cortisol était opposée ; l'exposition au stress chronique entraînant une augmentation des concentrations du cortisol et une diminution des concentrations de la DHEA (Pluchino et al., 2015). Ce phénomène favoriserait les conséquences physiologiques négatives du cortisol, notamment au niveau des fonctions cognitives (Boudarène et al., 2002 ; Pluchino et al., 2015). Cependant, d'autres études ont noté une augmentation des concentrations de la DHEA et/ou de la DHEAS en réponse à une situation de stress chronique (Boudarène et al., 2002; Oskis, Loveday, Hucklebridge, Thorn, et al., 2012; Oskis, Loveday, Hucklebridge, Wood, et al., 2012; Spiegel et al., 2006; Van Voorhees et al., 2014). Ce phénomène semble être lié à l'hyperactivité de l'axe HHS, la sécrétion de la DHEA étant, comme le cortisol, sous le

contrôle de la libération d'ACTH par l'hypophyse. Le processus de rémission d'une patiente souffrant d'anorexie nerveuse, caractérisée par une augmentation de la concentration salivaire du cortisol et de la DHEA, s'accompagnait d'une diminution de l'activité de l'axe HHS et d'une « normalisation » des concentrations salivaires des 2 hormones comparativement à des sujets sains (Oskis, Loveday, Hucklebridge, Wood, et al., 2012). L'augmentation de la sécrétion de la DHEA et de la DHEAS a également été interprétée comme un mécanisme de protection dans un contexte de stress intense, permettant d'atténuer les effets négatifs d'une exposition chronique au stress (Boudarène et al., 2002; Pluchino et al., 2015; Spiegel et al., 2006; Van Voorhees et al., 2014). En effet, l'impact physiologique de la DHEA et de la DHEAS, qui est opposé à celui du cortisol, permettrait de limiter les effets négatifs d'une hypercortisolémie, notamment au niveau des structures cérébrales, observée dans les situations de stress (Boudarène et al., 2002; Pluchino et al., 2015). Enfin, l'augmentation des concentrations salivaires de la DHEAS a été associée à des phases de récupération (i.e. sans stress) chez des sujets soumis à un stress chronique, ainsi qu'à une amélioration de leur humeur (Zarit et al., 2014). Dans ce contexte, l'augmentation de la sécrétion de la DHEAS aurait eu un effet bénéfique en stimulant les processus anaboliques, tant au niveau périphérique que central (Zarit et al., 2014).

Au-delà des concentrations du cortisol et de la DHEA, l'équilibre entre les 2 hormones est d'une grande importance dans les réponses psychobiologiques au stress (Boudarène et al., 2002; Pluchino et al., 2015; Van Voorhees et al., 2014). Elles partagent un précurseur commun, la prégnénolone, qui est une molécule dérivée du cholestérol. L'augmentation de la sécrétion de cortisol, consécutive à une situation de stress, réduirait la disponibilité de la prégnénolone pour la synthèse des androgènes surrénaliens, comme la DHEA (Bornstein & Chrousos, 1999). Dans cette perspective, de nombreuses études ont souligné l'intérêt d'une mesure concomitante des concentrations plasmatiques ou salivaires du cortisol et de la

DHEA, afin de mieux apprécier les éventuels dysfonctionnements de l'axe HHS (Boudarène et al., 2002; Oskis, Clow, et al., 2012). La mesure de la DHEA reflèterait de potentiels dysfonctionnements au niveau du cortex surrénalien, alors que la mesure du cortisol pourrait indiquer une altération de l'axe HHS et/ou un dérèglement de la voie extra-pituitaire (Oskis, Clow, et al., 2012). Dans cette perspective, le ratio $\text{Cortisol}/\text{DHEA}$ semble une mesure complémentaire à l'évaluation des concentrations du cortisol et de la DHEA (Boudarène et al., 2002; Filaire, Duché, & Lac, 1998; Pluchino et al., 2015; Van Voorhees et al., 2014).

✓ *La réponse de l'α-amylase salivaire au stress chronique*

A l'instar du cortisol et de la DHEA, les résultats portant sur l'influence du stress chronique sur les réponses de l'α-amylase salivaire sont contradictoires. Certains auteurs ont suggéré que des troubles de la personnalité (i.e. *Borderline Personality Disorder*) étaient associées à une diminution de l'activité de l'α-amylase salivaire en comparaison à une population de sujets sains (Nater et al., 2010). Inversement, d'autres études ont noté une augmentation ou une absence de variation de l'activité de l'α-amylase salivaire. A la suite d'une période de 16 semaines d'entraînement intensif, une augmentation de la réponse de l'α-amylase salivaire au réveil a été observée chez des joueuses de tennis de haut niveau, traduisant une hyperactivité du système SAM (Filaire et al., 2013). De même, des sujets souffrant de troubles psychiatriques (i.e. *Major Depressive Disorder*) présentaient des réponses de l'α-amylase salivaire au réveil significativement supérieures à celle d'une population de sujets sains (Booji et al., 2015). De plus, des sujets présentant des expériences de vie traumatisantes étaient caractérisés par une accentuation de la réactivité de l'α-amylase salivaire en réponse à une situation de stress psychologique (Ali & Pruessner, 2012; Yoon et al., 2016). Enfin, Hua et al. (2014) n'ont pas observé d'influence significative de l'alexithymie, qui est un trait de personnalité caractérisé par la difficulté à identifier et décrire ses émotions, sur les réponses de l'activité de l'α-amylase salivaire au TSST. La diversité des résultats observés pourrait être

la conséquence des différents indicateurs utilisés (i.e. réponses au réveil, valeurs de repos ou réponses à une situation de stress), ou bien de la nature du stress étudié (e.g. entraînement sportif, troubles de la personnalité). Certains auteurs ont émis l'hypothèse que cette diversité de résultats pouvait également être expliquée par les fortes variabilités intra- et interindividuelles observées sur les réponses de l' α -amylase salivaire (Booji et al., 2015). Au-delà de la variation isolée de l' α -amylase salivaire, l'observation du ratio $\alpha\text{-amylase}/\text{Cortisol}$ serait plus fiable pour refléter les potentiels dysfonctionnements de la réponse physiologique au stress (Ali & Pruessner, 2012; Filaire et al., 2013).

✓ *La dissociation des systèmes physiologiques du stress*

Certaines études ont mesuré parallèlement les indicateurs salivaires des 2 systèmes physiologiques du stress, permettant une observation simultanée de la réponse du système SAM et de l'axe HHS. Elles révèlent des phénomènes inverses entre les variations du cortisol et de l' α -amylase salivaire, se traduisant par une altération du ratio $\alpha\text{-amylase}/\text{Cortisol}$ (Ali & Pruessner, 2012 ; Filaire et al., 2013). En effet, la diminution de la concentration salivaire du cortisol a été associée à une augmentation de l'activité de l' α -amylase salivaire (Ali & Pruessner, 2012; Chennaoui et al., 2016; Filaire et al., 2013; Yoon & Wieirich, 2016), ce qui tend à renforcer l'hypothèse selon laquelle les 2 systèmes fonctionneraient de manière compensatoire, l'augmentation de l'un des systèmes compensant la diminution de l'autre (Ali & Pruessner, 2012; Chennaoui et al., 2016). Néanmoins, la modification du ratio $\alpha\text{-amylase}/\text{Cortisol}$ indiquerait une dissociation de la coordination des 2 axes physiologiques et serait le témoin d'un état de stress (Ali & Pruessner, 2012 ; Filaire et al., 2013).

En résumé, si la réponse des systèmes physiologiques du stress est nécessaire à la survie de l'individu, le dysfonctionnement de ces axes peut perturber son équilibre psychophysiologique et induire le développement de troubles pathologiques. L'activité de ces

systèmes physiologiques peut être mesurée par le biais de marqueurs salivaires, qui sont le cortisol, la DHEA et l' α -amylase. Cette évaluation peut être réalisée à travers la réponse au réveil et à une situation de stress physique et/ou psychologique.

c) Influence de la restriction alimentaire sur l'activité des systèmes physiologiques du stress

En préambule de ce paragraphe, nous avons abordé le principe d'homéostasie, par lequel l'organisme lutte pour maintenir ses constantes vitales dans des normes compatibles avec la vie. L'homéostasie énergétique est l'une de ces composantes. Elle est caractérisée par la disponibilité énergétique de l'organisme (*energy availability* en anglais), qui correspond au différentiel entre les apports énergétiques, issus de l'alimentation, et la dépense énergétique d'exercice. Elle détermine l'énergie disponible aux fonctions vitales de l'organisme, à savoir le métabolisme de base. La restriction alimentaire, associée à l'entraînement intensif chez les sportifs de haut niveau, peut perturber la disponibilité énergétique et induire des réponses physiologiques et comportementales visant à protéger l'homéostasie énergétique (Schaal et al., 2016). La régulation de l'homéostasie énergétique est un phénomène vaste et complexe, dont l'axe HHS et le système SAM font partie. D'autres voies de signalisation, tant au niveau périphérique, par l'intermédiaire de l'insuline, de la leptine et de la ghréline, qu'au niveau central, par l'intermédiaire des neurotransmetteurs, comme le neuropeptide Y, l'agoutine gene-related protein, l' α -MSH ou le CRH contribuent également à la régulation de la balance énergétique et du comportement alimentaire (Berthoud, 2004; Nieuwenhuizen & Rutters, 2008; Rabasa & Dickson, 2016; Schaal et al., 2016; Williams et al., 2001).

✓ *Influence sur l'activité des systèmes physiologiques du stress*

Les études portant sur la malnutrition chronique, en particulier chez les femmes souffrant de

troubles de l'alimentation, ont observé une hyperactivité de l'axe HHS, se traduisant par une augmentation du CAR et/ou de la concentration salivaire du cortisol (Filaire et al., 2015; Monteleone et al., 2011; Oskis, Loveday, Hucklebridge, Thorn, et al., 2012; Oskis, Loveday, Hucklebridge, Wood, et al., 2012) et de la DHEA (Oskis, Loveday, Hucklebridge, Thorn, et al., 2012; Oskis, Loveday, Hucklebridge, Wood, et al., 2012). De la même manière, une restriction alimentaire rapide induisait une augmentation des concentrations plasmatiques ou salivaires du cortisol (Degoutte et al., 2006; Pasiakos, Caruso, Kellogg, Kramer, & Lieberman, 2011; Tomiyama et al., 2010) et des concentrations plasmatiques de la DHEAS (Degoutte et al., 2006; Pasiakos et al., 2011). L'activation de l'axe HHS serait la conséquence d'une restriction des apports caloriques provoquant une réduction de la disponibilité énergétique (Filaire et al., 2015; Tomiyama et al., 2010). La libération de cortisol aurait pour conséquence de stimuler la prise alimentaire et de mobiliser les ressources énergétiques intracellulaires, ainsi que les processus de néoglucogenèse. Au-delà du stress physiologique, un comportement alimentaire restrictif constituerait un stress psychologique, stimulant l'activité de l'axe HHS (Berthoud, 2004; Nieuwenhuizen & Rutters, 2008). L'augmentation de la concentration plasmatique de la DHEAS, lors d'une période de restriction alimentaire, serait liée à la diminution de la concentration plasmatique d'insuline. En effet, l'insuline exerce un effet inhibiteur sur la synthèse de la DHEAS, la diminution de l'insulinémie, en conséquence de la baisse de la glycémie, permettrait de lever cette inhibition (Pasiakos et al., 2011). La DHEAS jouerait un rôle de régulation sur la libération de la leptine, qui est une hormone anorexigène, en réduisant sa sécrétion lors d'une période de restriction énergétique (Pasiakos et al., 2011). Néanmoins, d'autres études n'ont pas observé de variation des concentrations salivaires et/ou plasmatiques du cortisol chez des sujets obèses pratiquant des restrictions caloriques progressives (Tam et al., 2014) ou rapides (Johnstone et al., 2004). De même, les concentrations plasmatiques du cortisol n'étaient pas modifiées chez des nageuses

de natation synchronisée en situation de déficit énergétique, au cours d'une phase d'entraînement intensif (Schaal et al., 2016). Enfin, une restriction alimentaire de courte durée (i.e. 3 semaines à 1200 kcal.j⁻¹) chez des sujets féminins en bonne santé induisait une augmentation de la valeur de l'AUCg du cortisol salivaire, sans variation significative du CAR (Tomiya et al., 2010). L'absence de variation pourrait être expliquée par l'influence de la restriction calorique sur le métabolisme périphérique du cortisol (Johnstone et al., 2004 ; Tam et al., 2014) et/ou la modalité de la restriction alimentaire ; une phase de jeûne de 6 jours entraînait une augmentation des concentrations plasmatiques du cortisol, alors qu'un régime hypocalorique de 21 jours (2.55 MJ.j⁻¹) n'induisait pas de modification (Johnstone et al., 2004).

Les études portant sur l'influence de la restriction alimentaire sur l'activité du système SAM et l'activité de l' α -amylase salivaire sont plus rares. Chez des sujets souffrant de troubles du comportement alimentaire, la restriction chronique des apports nutritionnels induisait une hypoactivité du système SAM, caractérisée par une atténuation de la réponse de l' α -amylase salivaire au réveil (Filaire et al., 2015; Monteleone et al., 2011).

Au regard de ces résultats, la restriction des apports alimentaires semble représenter un stress pour l'organisme se traduisant par une altération de l'activité de l'axe HHS et du système SAM. Cependant, les études portant sur des sujets sains et/ou sportifs n'ont pas permis de confirmer ces résultats. En effet, aucune modification significative des concentrations plasmatiques ou salivaires du cortisol n'a été montrée à la suite de périodes de restriction alimentaire progressive ou répétée, que ce soit chez de jeunes femmes actives ou des sportifs entraînés (Mero et al., 2010; Mettler et al., 2010; Roemmich & Sinning, 1997a). Les caractéristiques de la population étudiée (i.e. sujets sains vs pathologies du comportement alimentaire), les modalités de la restriction alimentaire (i.e. régime rapide vs progressif), ainsi que l'origine de l'évaluation des marqueurs (i.e. sang vs salive) pourraient expliquer ces

différences. Par conséquent, les conclusions portant sur l'influence de la restriction alimentaire sur les systèmes physiologiques du stress chez des sportifs de haut niveau restent à définir.

✓ *Influence sur les réponses physiologiques au stress de l'exercice*

L'entraînement sportif représente un stress physique et psychologique pouvant influencer l'activité de l'axe HHS (Viru & Viru, 2004), induisant une libération du cortisol et une activation du métabolisme énergétique permettant d'accroître la fourniture énergétique (Hellhammer et al., 2009). La diminution de la réponse du cortisol à l'exercice a été décrite comme un potentiel indicateur d'un état de fatigue chez des sujets sportifs (Fry, Kraemer, & Ramsey, 1998; Viru & Viru, 2004). Le stress physique induit également une stimulation du système SAM, caractérisée par une augmentation de l'activité de l' α -amylase salivaire immédiatement à la suite de l'effort (Chatterton et al., 1996; Chiodo et al., 2011; Kivlighan & Granger, 2006). Cette réponse a été interprétée comme un indicateur de l'activité accrue du système SAM permettant de soutenir l'augmentation des besoins énergétiques liés à l'exercice (Ball, 2015; Nater & Rohleder, 2009), mais aussi comme une élévation de l'activité enzymatique favorisant l'apport de glucose au cours d'une sollicitation intense (Kivlighan & Granger, 2006; Nater & Rohleder, 2009). La mesure des réponses hormonales à l'exercice, lors d'une phase de restriction alimentaire, semble une préoccupation capitale au regard du rôle majeur joué par l'axe HHS et le système SAM pendant l'exercice physique (Ball, 2015; Kivlighan et Granger, 2006; Nater & Rohleder, 2009; Viru & Viru, 2004). A notre connaissance, seule une étude a exploré l'influence de la restriction alimentaire sur les réponses du cortisol à l'exercice. A la suite d'une période de 7 jours de restriction alimentaire conduisant à une perte de poids 4.2%, Abdelmalek et al. (2015) ont observé une augmentation de la réponse du cortisol plasmatique à l'exercice chez des judokas. Ces auteurs proposaient que l'augmentation de la réponse du cortisol à l'exercice était la conséquence de

la réduction des apports glucidiques au cours de la période de restriction. A notre connaissance, il semble que l'influence de la restriction alimentaire sur la réponse de l' α -amylase salivaire à l'exercice n'ait pas été étudiée.

✓ *Une adaptation chronique à la restriction alimentaire*

Certains auteurs ont rapporté des mécanismes adaptatifs à la restriction énergétique chronique (Trexler, Smith-Ryan, & Norton, 2014). L'exposition récurrente à des périodes de stress énergétique induirait une amélioration de certains processus métaboliques, favorisant l'économie des ressources énergétiques (Paillard, 2006; Trexler et al., 2014). Ces adaptations se caractériseraient par une diminution du métabolisme de base, une meilleure efficacité du métabolisme d'exercice et une diminution de l'effet thermogénique des aliments, associées à une réduction de l'activité physique spontanée (Trexler et al., 2014). Ces mécanismes adaptatifs ont pour objectif de préserver l'homéostasie énergétique en limitant les dépenses énergétiques et en optimisant les apports. Le corollaire de ces adaptations physiologiques est l'émergence d'un phénomène de résistance au processus de perte de poids, impliquant progressivement une intensification des méthodes de restriction alimentaire (Horswill et al., 1990; Paillard, 2006; Trexler et al., 2014). Comme nous l'avons indiqué précédemment, ce phénomène semble être accentué par la précocité de la pratique de la perte de poids chez le sportif (Artioli, Gualano, et al., 2010; Sundgot-Borgen & Garthe, 2011). Ce cercle vicieux augmenterait le risque d'apparition de troubles du comportement alimentaire (El Ghoch et al., 2013; Filatre et al., 2007) et pourrait aggraver les perturbations des systèmes physiologiques du stress. Néanmoins, ces éléments nécessitent d'être étudiés et confirmés auprès d'une population sportive (Trexler et al., 2014).

III. INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE SUR LES PARAMETRES PSYCHOLOGIQUES

III.1. Les paramètres psychologiques et performance sportive

Les paramètres psychologiques sont un facteur central de la performance sportive et renvoient à des aspects complexes et variés, tels que la gestion des émotions, du stress, ou encore les aspects cognitifs. De nombreux modèles ont été décrits pour mettre en avant les relations existant entre la performance sportive et l'état psychologique (modèle du U inversé, Zone of Optimal Functioning, modèle de la catastrophe) (Filaire, Maso, Sagnol, et al., 2001). Bien que notre objet ne soit pas de faire une revue exhaustive de la littérature quant aux relations entre psychologie et performance, il semble néanmoins nécessaire de mettre en avant l'existence de ces interactions, mais également leur complexité. Dans notre protocole de recherche, nous avons volontairement choisi de nous focaliser sur 2 paramètres essentiels de cette composante, à savoir l'humeur et l'équilibre entre le stress et la récupération perçus.

a) L'humeur

L'évaluation de l'humeur, en tant que paramètre de la performance sportive, a été mise en avant par les travaux Morgan et ses collaborateurs, grâce à l'utilisation du questionnaire du *Profile of Mood States* (POMS) (Beedie, Terry, & Lane, 2000; Morgan, Brown, Raglin, O'Connor, & Ellickson, 1987). Le POMS est un questionnaire composé de 65 items, notés de 1 à 5 pour évaluer l'adhésion du participant à la proposition : 1 correspondant à « pas du tout » et 5 à « extrêmement ». Afin de formaliser la procédure, les opérateurs doivent introduire le questionnaire en posant la question suivante au participant « comment vous êtes-

vous senti au cours de la semaine précédente, en incluant aujourd'hui ? ». Les résultats permettent une évaluation des niveaux de tension, de dépression, de colère, de vigueur, de fatigue et de confusion. Le score global est obtenu en additionnant les 5 états dits négatifs (i.e. tension, dépression, colère, fatigue et confusion) et en soustrayant l'état positif de vigueur (Mc Nair & Lorr, 1971). Les travaux de Morgan et de ses collaborateurs (1987) avaient permis d'observer un profil différent chez les sportifs, en comparaison à une population d'individus sédentaires, se traduisant par des scores inférieurs sur les items négatifs (confusion, dépression, fatigue, tension, colère) parallèlement à un score supérieur sur l'item positif de vigueur. Ce profil a été décrit comme un profil en iceberg (Morgan et al., 1987) et a été identifié, dans le domaine des sciences du sport, comme un état facilitant la performance (Beedie et al., 2000).

Il est également important de mettre en avant l'aspect dynamique de cet indicateur. En effet, de nombreuses études ont mis en avant qu'une augmentation de la charge d'entraînement induisait une augmentation du score des items négatifs et/ou une baisse du score de vigueur (Achten et al., 2004; Fry et al., 1994; Morgan et al., 1987). Dans cette perspective, l'intensité de l'entraînement semble être le facteur majeur de la modification des résultats du POMS (Díaz Gómez, Bocanegra Jaramillo, Teixeira, & Espindola, 2013). Cependant, des résultats contradictoires ont également été observés, se traduisant par une accentuation du profil en iceberg (Filaire, Legrand, Lac, & Pequignot, 2004). A cet égard, Morgan et al. (1987) soulignaient l'importance des variations interindividuelles et la nécessité d'une interprétation personnelle des résultats. Dans le cas d'une réduction de la charge d'entraînement, une dynamique inverse a été observée, caractérisée par une augmentation du score de vigueur et une diminution du score de fatigue (Fry et al., 1994; Morgan et al., 1987).

Au regard de ces éléments, l'évaluation de l'humeur par le POMS semble être un outil pertinent pour évaluer l'aptitude d'un sportif à la performance (Beedie et al., 2000; Filaire,

Lac, & Pequignot, 2003; Morgan et al., 1987). Néanmoins, cet indicateur est soumis à des variations sous l'influence de facteurs externes, tels que la charge d'entraînement, qu'il est nécessaire de contrôler.

b) La balance stress/récupération

Le processus d'entraînement se doit de soumettre le sportif à un équilibre optimal entre les phases de stress et de récupération. Certains chercheurs ont proposé une évaluation de la perception des états de stress et de récupération par le biais du REcovery and STress Questionnaire (RESTQ), pour définir leur niveau, ainsi que leur dynamique dans le temps (Kellmann & Kallus, 2001). Le RESTQ-Sport est composé de 52 affirmations évaluées de 0 à 6 pour mesurer la fréquence à laquelle les participants ont éprouvé les sensations ou émotions décrites : 0 correspondant à « jamais » et 6 à « toujours ». Ces résultats permettent de renseigner 19 items relatifs à 4 grands domaines ; les niveaux de stress et de récupération d'ordre général (i.e. *general stress score*, *general recovery score*), ainsi que les niveaux de stress et de récupération spécifiques au versant sportif (i.e. *sport-related stress*, *sport-related recovery*) (Kellmann, 2010).

Le RESTQ a été utilisé pour permettre le suivi des sportifs de haut niveau, notamment dans la perspective de prévenir les phénomènes de surmenage et de surentraînement (Filaire et al., 2013; Kellmann, 2010; Purge, Jürimäe, & Jürimäe, 2006). La modification de cet équilibre, dans le sens d'une augmentation du niveau de stress et/ou une diminution du niveau de récupération, représenterait une altération des capacités adaptatives de l'individu pouvant être néfaste à la performance (Kellmann, 2010). La variation des items du RESTQ a été corrélée avec les variations de la charge d'entraînement (Filaire et al., 2013; Kellmann, 2010; Purge et al., 2006). L'augmentation de la charge d'entraînement a été associée à une augmentation du score des items relatifs au stress et une diminution du score des items relatifs à la récupération

(Filaire et al., 2013; Purge et al., 2006), bien que des résultats contradictoires aient été observés (Purge et al., 2006). Enfin, certains items du RESTQ (e.g. *Physical Complaints*) ont été corrélés avec des indicateurs physiologiques (i.e. cortisol, créatine kinase, α -amylase) au cours de phases d'entraînement intensif (Filaire et al., 2013; Kellmann, 2010).

A l'instar du POMS, le RESTQ apparaît comme un outil fiable et pertinent pour observer l'équilibre entre les 2 facteurs majeurs de l'adaptation, à savoir le niveau de stress et la capacité de récupération. Comme l'humeur, la variation de ces 2 composantes traduirait l'évolution de la capacité de performance du sportif et serait également influencée par la dynamique de la charge d'entraînement (Filaire et al. 2013; Kellmann, 2010; Purge et al., 2006).

III.2. Influence de la restriction alimentaire

From a few weeks before the competition it is almost all about the food. Once you decide to start [dieting], everything looks really delicious Pettersson et al. (2012)

La restriction alimentaire a été associée à un impact négatif sur l'humeur, se traduisant par une réduction de l'item de vigueur et une augmentation des items relatifs au stress (confusion, colère, dépression, fatigue, tension) (Degoutte et al., 2006; Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001; Hall & Lane, 2001; Horswill et al., 1990; Koral & Dosseville, 2009; Marttinen et al., 2011). De la même manière, Jlid et al. (2013) ont observé une augmentation de la difficulté perçue (*Rate of Perceived Exertion*, RPE) lors d'un exercice standardisé à la suite d'une restriction alimentaire de 7 jours. Ces modifications témoignent de la fatigue mentale engendrée par le régime alimentaire (Jlid et al., 2013) et pourraient être la conséquence des effets physiologiques associés à la perte de poids, tels que la déshydratation et l'hypoglycémie (D'Anci, Vibhakar, Kanter, Mahoney, & Taylor, 2009; Pettersson & Berg, 2014; Pettersson et al., 2012). Dans cette perspective, Achten et al. (2004) constataient, à la suite d'une période

de 11 jours d'entraînement intensif en endurance, que l'altération de l'humeur était accentuée par un apport glucidique modéré ($5.5 \text{ g.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$) en comparaison à un apport élevé ($8.5 \text{ g.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$). De même, lors d'une restriction alimentaire de 4 jours, la dégradation de l'humeur était moins importante chez le groupe ayant reçu un apport glucidique élevé (65.9% des AET) en comparaison du groupe ayant reçu un apport faible (41.9% des AET) (Horswill et al., 1990). Ces résultats indiqueraient qu'une forte réduction des apports glucidiques pourrait altérer les indicateurs psychologiques, suggérant l'installation d'un état de fatigue (Achten et al., 2004; Degoutte et al., 2006; Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001; Horswill et al., 1990).

La restriction alimentaire entraînerait également une diminution des apports en micronutriments et accentuerait le risque de carences en certaines vitamines (Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001; Fogelholm et al., 1993; Reljic et al., 2015). Certaines, en particulier les vitamines du groupe B, jouent un rôle essentiel dans le métabolisme des glucides, des lipides et des protides, dans la synthèse des neurotransmetteurs, ainsi que des éléments structuraux des neurones (Loria-Kohen et al., 2013; Roth-Maier, Kettler, & Kirchgessner, 2002). La déficience en certaines vitamines, objectivée par de faibles concentrations plasmatiques, a été associée à l'altération des paramètres cognitifs (Selhub, Bagley, Miller, & Rosenberg, 2000). De la même manière, de fortes concentrations plasmatiques d'homocystéine, dont la variation est proportionnelle à la carence en vitamines, ont été associées à l'émergence de certaines maladies dégénératives du système nerveux central, telles que la maladie d'Alzheimer (Selhub et al., 2000). Par conséquent, la réduction des apports en vitamines B, induite par la restriction des apports alimentaires, pourrait altérer les fonctions cognitives et l'humeur des individus. Cependant, de précédentes études n'ont pas observé de variation significative des concentrations plasmatiques des vitamines du groupe B, malgré des apports insuffisants en vitamines (Fogelholm et al., 1993; Reljic et al., 2015).

Différentes études ont également constaté des résultats divergents concernant l'influence de la restriction alimentaire sur les indicateurs psychologiques. Des effets positifs sur l'humeur, notamment une diminution du score de l'item de dépression, ont été rapportés chez une population de femmes actives à la suite d'une période de restriction alimentaire de 4 semaines (Mero et al., 2010). Ce résultat pourrait être expliqué par la satisfaction et le bien-être associé à l'amélioration de l'image corporelle des sujets (Mero et al., 2010). De même, un régime hypocalorique et hypoglucidique chez des sujets féminins s'était traduit par des scores de confusion inférieurs à un groupe similaire ayant pratiqué un régime hypocalorique avec une répartition équilibrée des macronutriments (D'Anci, Watts, Kanarek, & Taylor, 2009). Ces résultats seraient le témoin d'une variation interindividuelle de l'influence de la restriction alimentaire sur les aspects cognitifs, qui serait liée à la perception individuelle du bénéfice potentiel de la perte de poids sur les aspects esthétiques et/ou de la performance (D'Anci, Watts, et al., 2009; Pettersson et al., 2013). De plus, les différentes stratégies alimentaires utilisées pourraient également expliquer ces divergences (Foster et al., 1992; Helms et al., 2015; Mettler et al., 2010; Wilson, Drust, Morton, & Close, 2014). Mettler et al. (2010) ont observé qu'une phase de restriction énergétique de 2 semaines, associée à des apports protidiques élevés ($2.3 \text{ g.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$), provoquait une plus forte altération des paramètres psychologiques qu'un régime similaire avec des apports protidiques inférieurs ($1 \text{ g.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$). Néanmoins, dans une étude proche de celle de Mettler et al. (2010), des résultats opposés ont été constatés. Le régime hypocalorique basé sur des apports protidiques élevés ($2.8 \text{ g.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$) permettait de limiter les répercussions sur l'humeur, la fatigue, la frustration alimentaire et le niveau de stress (Helms et al., 2015). Enfin, le type de questionnaire pourrait également contribuer aux divergences observées dans la littérature ; l'utilisation concomitante des questionnaires du DALDA (*Daily Analysis of Life Demands of Athletes*) et du POMS ayant abouti à des résultats différents (Helms et al., 2015; Mettler et al., 2010).

Au regard de ces éléments, il semble indispensable que les indicateurs psychologiques soient évalués au cours de la période de restriction alimentaire à l'aide d'outils standardisés et validés. Au-delà de la perte de poids, la quantification des apports nutritionnels est essentielle à l'interprétation de ces résultats.

III.3. **La perte de poids, un avantage psychologique ?**

Ça forge un mental. Sans régime, j'aurais l'impression d'arriver à la compète en touriste. C'est un peu notre premier combat en fait. S. Guenot (2008), champion olympique de lutte gréco-romaine

Telle était la question centrale posée dans la revue de littérature de Pettersson et al. (2013). En effet, de nombreuses études ont rapporté que les sportifs percevaient la perte de poids comme un facteur bénéfique à la performance (Franchini et al., 2012; Hall & Lane, 2001; Pettersson et al., 2012, 2013; Steen & Brownell, 1990). La perte de poids est considérée comme une étape incontournable et représente un moyen de préparation psychologique à la compétition (Hall & Lane, 2001; Pettersson et al., 2013; Steen & Brownell, 1990). Elle agirait comme une stratégie de diversion mentale, permettant au sportif de focaliser son stress émotionnel sur une problématique concrète et de développer un sentiment de contrôle (Pettersson et al., 2013). La perte de poids représente également un défi pour le sportif, à la fois physique et psychologique. Tout se déroule comme si le sportif éprouvait le besoin de prouver, voire d'éprouver, sa détermination et sa résistance au mal, au travers de méthodes de restriction drastiques. Lorsqu'elle est réussie, cette perte de poids se traduit par une première victoire lors de la pesée et contribue à développer la confiance en soi du sportif (Pettersson et al., 2013). Au-delà de l'impact psychologique, l'apparence physique, atteinte après la perte de poids, représente un message aux adversaires permettant d'afficher le niveau de souffrance enduré, ainsi que le niveau de préparation du sportif (Pettersson et al., 2013; Turocy et al.,

2011). Hall & Lane (2001) avaient demandé à des boxeurs de réaliser un test physique, basé sur un enchaînement d'exercices physiques non-spécifiques, lors d'une période à poids constant et à la suite d'une période de perte de poids. Les participants devaient annoncer leurs objectifs de performance avant chaque test. Il était curieux d'observer que les prévisions étaient significativement supérieures à la suite de la phase de perte poids, en comparaison à la phase à poids constant. Bien que les performances effectives n'aient pas été différentes, ces résultats attestaient de la perception positive du processus de perte de poids sur le sentiment de préparation et de performance des boxeurs (Hall & Lane, 2001).

IV. INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE SUR LA PERFORMANCE

IV.1. Apports nutritionnels, adaptations à l'entraînement et performances

Les apports nutritionnels sont un facteur central à la récupération du sportif, mais également à l'optimisation des mécanismes adaptatifs recherchés par l'entraînement (Hawley, Gibala, & Berman, 2007; Hawley, Tipton, & Millard-Stafford, 2006; Phillips & Van Loon, 2011). La qualité, la quantité, mais également le timing des apports nutritionnels, notamment en glucides et en protéines, contribuent à la restauration des réserves énergétiques et aux mécanismes de synthèse des protéines musculaires, et permettent de maximiser les processus adaptatifs à l'entraînement (Burke, Hawley, Wong, & Jeukendrup, 2011; Hawley et al., 2007, 2006; Ivy, 1991; Morton, McGlory, & Phillips, 2015; Phillips, 2014; Phillips & Van Loon, 2011; Slater & Phillips, 2011). La modification du comportement alimentaire pourrait perturber l'équilibre nutritionnel et avoir des répercussions négatives sur les adaptations à l'entraînement et le niveau de performance.

IV.2. Quels types de performance et quelles conséquences ?

De nombreuses études se sont intéressées à cette problématique en essayant de mesurer l'impact de la perte de poids sur les indicateurs de performance. Compte-tenu de la difficulté de mesurer la performance dans un contexte compétitif (Le Panse et al., 2012), la plupart des études ont proposé des mesures indirectes de la performance sportive, en évaluant les qualités physiques spécifiques à la discipline.

Dans les disciplines d'endurance, il semble que la VO_2 max absolue ne soit pas ou peu affectée par la perte de poids, bien que la VO_2 max relative semble être améliorée (Paillard, 2006). Cependant, les effets seraient différents en fonction des modalités utilisées pour la perte de poids. Une perte de poids basée sur la réduction des apports glucidiques réduirait la restauration des réserves de glycogène, ce qui pourrait représenter un facteur limitant sur les épreuves d'endurance (Burke et al., 2011; Hawley et al., 2006; Ivy, 1991). Une perte de poids essentiellement basée sur la déshydratation présente des répercussions sur le fonctionnement du système cardio-vasculaire, se traduisant par une augmentation de la fréquence cardiaque et la viscosité sanguine, mais également sur la régulation de l'homéostasie thermique (Cengiz, 2015; Paillard, 2006). L'altération des fonctions cardio-vasculaires entraînerait une diminution de la capacité de l'organisme à produire de l'énergie de manière aérobie et limiterait l'évacuation de la chaleur, favorisant l'apparition de la fatigue. La déshydratation aurait également un impact délétère sur les fonctions vestibulaires, ce qui pourrait altérer les performances sur le plan postural (Jlid et al., 2013).

D'autres études ont mesuré l'influence de la restriction alimentaire sur des exercices intermittents (Artioli, Iglesias, et al., 2010; Hall & Lane, 2001; Horswill et al., 1990; Walberg et al., 1988) et/ou de courte durée avec une intensité maximale, au travers du test de Wingate (i.e. effort maximal de 30 secondes) sur vélo ou sur un ergomètre à bras (i.e. winch) (Artioli, Iglesias, et al., 2010; Cengiz, 2015; Fogelholm et al., 1993; Martinen et al., 2011; Mettler et al., 2010; Sawyer et al., 2013), ou lors d'un test de sauts répétés pendant 30 secondes (Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001). Le Tableau 2 récapitule les principaux résultats de la littérature au regard de l'influence de la restriction alimentaire sur les indicateurs de la performance. La majorité des études ont observé que la performance sur des épreuves de type intermittent ou sur le test de Wingate n'était pas altérée à la suite de la période de restriction alimentaire (Artioli, Iglesias, et al., 2010; Cengiz et al., 2015; Fogelholm et al., 1993; Hall & Lane, 2001;

Horswill et al., 1990; Marttinen et al., 2011; Mettler et al., 2010; Sawyer et al., 2013; Walberg et al., 1988). Cependant, une diminution de la performance, mesurée lors d'une épreuve de 10 contractions maximales du quadriceps d'une durée de 10 secondes, espacées d'une phase de récupération de 5 secondes, a été observée à la suite d'un régime hypocalorique ($18 \text{ kcal.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$) de 7 jours (Walberg et al., 1988). Ce phénomène était uniquement présent pour le groupe ayant eu de faibles apports glucidiques (50% des AET), alors que la performance était maintenue pour le groupe ayant eu un apport glucidique supérieure (70% des AET). Il est intéressant de noter que la performance n'était pas modifiée, quelque soit le groupe considéré, sur un test similaire sollicitant la musculature du haut du corps (i.e. biceps brachial) (Walberg et al., 1988). Suite à une perte de poids de 5% en 3 jours, basée sur une restriction des apports alimentaires et hydriques, Cengiz (2015) observait également des résultats différents sur le Wingate test en fonction de la musculature sollicitée chez des lutteurs entraînés. En effet, s'il constatait une augmentation de l'index de fatigue sur le membre inférieur, aucune variation n'était notée sur le membre supérieur après la période de restriction alimentaire (Cengiz, 2015). Enfin, Filaire, Maso, Degoutte, et al. (2001) ont observé une diminution de la performance sur un test de sauts verticaux (CMJ) répétés pendant 30 secondes à la suite d'une période de restriction alimentaire chez des judokas. Par conséquent, lors d'une période de restriction alimentaire, les apports glucidiques semblent jouer un rôle essentiel dans la capacité à maintenir un niveau de performance sur un test énergétique, notamment lorsqu'il mobilise fortement la filière anaérobie lactique. Ce phénomène pourrait être expliqué par l'altération de l'équilibre acido-basique, limitant les capacités tampon de l'organisme sous l'effet de la restriction des apports glucidiques (Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001). Cependant, l'impact sur le niveau de performance pourrait dépendre des groupes musculaires sollicités (haut du corps vs bas du corps).

Les études concernant l'influence de la perte de poids sur les capacités de force maximale ont abouti à des résultats contradictoires (Tableau 2). Certains auteurs ont observé une diminution de ces capacités (Degoutte et al., 2006; Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001; Jlid et al., 2013; Mero et al., 2010; Robinson et al., 2015; Roemmich & Sinning, 1997b; Viitasalo et al., 1987), alors que d'autres n'ont pas observé de modification (Helms et al., 2015; Marttinen et al., 2011; Sawyer et al., 2013). Seules 2 études ont montré une augmentation des niveaux de force maximale (Garthe et al., 2011; Sawyer et al., 2013). L'étude menée par Garthe et al. (2011) rapportait une augmentation du niveau de force maximale sur des exercices de squat, de développé-couché et de tirage. Néanmoins, l'étude se basait sur une perte de poids progressive, d'une durée moyenne de 8 semaines, avec l'intégration de séances de musculation, qui ne faisaient pas partie du programme habituel des participants. De ce fait, il était difficile de distinguer l'influence de la perte de poids, des adaptations liées à l'intégration de la musculation dans le programme d'entraînement. Dans l'étude de Sawyer et al. (2013), l'objectif était d'évaluer l'influence d'une réduction des apports glucidiques ($< 30 \text{ g.j}^{-1}$), mais sans modifier l'apport énergétique total. Bien que les auteurs aient constaté une diminution significative du poids de corps, celle-ci était inférieure à celle rapportée dans d'autres études ($< 2 \text{ kg}$). La divergence des résultats semble être également liée aux modalités d'évaluation, certains auteurs ayant utilisé des mouvements basiques comme la force de préhension (Degoutte et al., 2006; Marttinen et al., 2011; Sawyer et al., 2013) ou la force maximale isométrique (Viitasalo et al., 1987), alors que d'autres ont eu recours à des mouvements plus complexes comme le développé-couché (Mero et al., 2010; Sawyer et al., 2013) et/ou le squat (Judelson et al., 2007; Mero et al., 2010; Sawyer et al., 2013). Si l'influence sur les qualités de force maximale absolue reste en débat, la force maximale relative au poids de corps augmenterait à la suite de la perte de poids (Mettler et al., 2010;

Robinson et al., 2015). Ce phénomène s'expliquerait par l'augmentation de l'efficacité musculaire sous l'effet de la perte de poids (Mero et al., 2010).

Sur le plan de la puissance musculaire, Mero et al. (2010) ont constaté qu'une perte de poids progressive se traduisait par une amélioration des performances sur le test de CMJ chez une population de femmes physiquement actives. A l'instar des qualités de force relative, l'amélioration des capacités de puissance serait la conséquence d'une augmentation du ratio $\frac{\text{Puissance}}{\text{Poids}}$ (Mero et al., 2010). Les modalités de la perte de poids semblent influencer les répercussions sur le niveau de puissance. En effet, alors qu'une déshydratation passive (i.e. sauna) (Viitasalo et al., 1987) ou active (exercice en condition de chaleur) (Judelson et al., 2007) n'entraînaient pas d'altération significative de la performance sur le CMJ, une déshydratation causée par la prise de diurétiques (-2.5% en 24 heures) se traduisait par une augmentation de la performance sur le CMJ (Viitasalo et al., 1987). De la même manière, si une perte de poids rapide ne semble pas impacter la performance sur le CMJ, une perte de poids progressive permettrait une augmentation significative des capacités de détente (Fogelholm et al., 1993; Garthe et al., 2011). Dès lors, l'influence de la perte de poids sur les capacités neuromusculaires pourrait, en partie, être influencée par la prise de produits exogènes (i.e. diurétiques) (Viitasalo et al., 1987), mais également par la progressivité du processus, une perte de poids progressive semblant plus favorable qu'une perte de poids rapide (Fogelholm et al., 1993; Garthe et al., 2011). D'autres études n'ont pas rapporté de variation sur les capacités de puissance du membre inférieur (Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001; Fogelholm et al., 1993; Garthe et al., 2011; Koral & Dosseville, 2009). Le maintien du niveau de performance, malgré la restriction des apports alimentaires, pourrait être expliqué par l'absence de variation des concentrations intramusculaires en ATP et phosphocréatine, principalement sollicitées sur les tests de puissance maximale (Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001; Koral & Dosseville, 2009; Viitasalo et al., 1987). La durée de la période de

récupération post-pesée, ainsi que les stratégies nutritionnelles utilisées, pourraient également favoriser le maintien de la performance (Artioli, Iglesias, et al., 2010; Fogelholm et al., 1993; Mendes et al., 2013). Cependant, Viitasalo et al. (1987) ont constaté que la performance réalisée sur le CMJ après la perte de poids était significativement inférieure à la performance théorique attendue, laissant envisager un potentiel effet négatif de la perte de poids sur les capacités de production de force et de puissance par le système neuromusculaire.

Au regard de ces résultats, il semble que la perte de poids ait un effet néfaste sur les capacités de performance physique, bien que les résultats soient parfois contradictoires. Les divergences observées peuvent être attribuées aux qualités physiques explorées (i.e. facteurs énergétiques, force maximale, puissance maximale) (Fogelholm et al., 1993; Garthe et al., 2011; Mero et al., 2010; Mettler et al., 2010), ainsi qu'aux modalités d'évaluation employées (Garthe et al., 2011; Martinen et al., 2011; Mettler et al., 2010; Sawyer et al., 2013). Les caractéristiques de la perte de poids (i.e. graduelle vs rapide) (Fogelholm et al., 1993; Garthe et al., 2011), la quantité de poids perdu (Viitasalo et al., 1987), la composition du régime alimentaire (Helms et al., 2015; Mettler et al., 2010; Sawyer et al., 2013; Walberg et al., 1988), la période de récupération entre la pesée et l'évaluation de la performance (Artioli, Iglesias, et al., 2010; Fogelholm et al., 1993; Mendes et al., 2013), mais également l'utilisation de substances exogènes (i.e. diurétiques) (Viitasalo et al., 1987) sont également des facteurs pouvant expliquer ces différences.

Tableau 2: Influence de la perte de poids sur le niveau de performance physique.

Auteur(s) et année	Population testée	Protocoles Perte de poids	Tests utilisés Indicateurs de performance	Influence sur la performance
Viitasalo et al. (1987)	25 Hommes Sportifs	Sauna : 3x15' à 80-85° -3.4%	CMJ CMJ avec lest (+20,40,60,80 kg) FMI, RFD Leg extension	Ø Ø ↓
		Régime + diurétiques (furosémide, 1mg.kg ⁻¹) -5.8% en 60 heures	CMJ CMJ avec lest (+20,40,60,80 kg) FMI, RFD Leg extension	Ø Ø ↓
		Prise de diurétiques (furosémide, 1mg.kg ⁻¹) -2.5%	CMJ CMJ avec lest (+20,40,60,80 kg) FMI, RFD Leg extension	↑ ↑ Ø
Walberg et al. (1988)	19 Hommes Culturistes entraînés	Régime hypocalorique (7 jours, 18 kcal.kg ⁻¹ .j ⁻¹) 1.6 g prot⁻¹.kg⁻¹.j⁻¹ + Glucides, 50% AET	10x10s CMV, récupération de 5s Quadriceps Biceps brachial	↓ Ø
		Régime hypocalorique (7 jours, 18 kcal.kg ⁻¹ .j ⁻¹) 0.8 g prot⁻¹.kg⁻¹.j⁻¹ + Glucides, 70% AET	10x10s CMV, récupération de 5s Quadriceps Biceps brachial	Ø Ø
Horswill et al. (1990)	12 Hommes Lutte, HN	2x4 jours de restriction alimentaire LC : 41.9% Glu. 46.7% Lip. 11.7% Prot HC : 65.9% Glu. 22.7% Lip. 11.7% Prot 1 semaine entre les 2 périodes de régime	Effort intermittent sur winch 8x15s, avec une récupération de 30s	Ø Période 1 ↓ Période 2 avec ↓ LC > ↓ HC
Fogelholm et al. (1993)	10 Hommes Judo et Lutte	Perte de poids graduelle 3 semaines, -5% PdC	Test de Wingate 1 minute Sprint 30m, CMJ CMJ + 50% PdC	Ø Ø ↑
		Perte de poids rapide 2.4 jours + recharge de 5h, -6% PdC	Test de Wingate 1 minute Sprint 30m, CMJ CMJ + 50% PdC	Ø Ø Ø
Roemmich & Sinning (1997b)	9 Hommes Lutte, HN	Suivi longitudinal au cours de la saison sportive Pertes de poids répétées	Test isocinétique (force et puissance) Flexion/Extension du genou Flexion/Extension du coude	↓ ↓

Filaire, Maso, Degoutte, et al. (2001)	11 Hommes Judo, HN	Perte de poids rapide (7 jours)	Force de préhension SJ, CMJ, CMJ 7s CMJ 30s	↓ (gauche seulement) ∅ ↓
Hall & Lane (2001)	16 Hommes Boxe entraînés	Perte de poids rapide (1 semaine)	Enchaînement [1 pompe + 1 burpee] Maximum de répétitions en 4x2 min Récupération=1min entre les séries	∅
Degoutte et al. (2006)	20 Hommes Judo entraînés	Perte de poids rapide (1 semaine)	Force de préhension	↓
Judelson et al. (2007)	7 Hommes Musculature entraînés	Perte de poids par déshydratation (-2.5%)	Force maximale, Squat CMJ, SJ	∅
		Perte de poids par déshydratation (-5%)	Force maximale, Squat CMJ, SJ	∅
Koral & Dosseville (2009)	10 Hommes 10 Femmes Judo, HN	Combinaison d'une perte de poids progressive (3 semaines, -4MJ.j ⁻¹) et d'une phase de déshydratation active (1 semaine)	SJ, CMJ Rowing à 70% 1RM Test spécifique Judo, 3x5s Test spécifique Judo, 30s	∅ ∅ ∅ ↓
Artioli, Iglesias, et al. (2010)	14 Hommes Judo entraînés	Perte de poids rapide (5-7 jours) suivie d'une phase de recharge de 4h suivant la pesée Protocole proche de Fogelholm et al. (1993)	<i>Specific Judo Fitness Test</i> Test de Wingate sur Winch	∅ ↑
Mero et al. (2010)	15 Femmes Actives	Perte de poids progressive sur 4 semaines Perte de poids d'1kg / semaine	CMJ Force maximale DC (1RM)	↑ ↓
		Perte de poids progressive sur 4 semaines Perte de poids de 0.5kg / semaine	CMJ Force maximale DC (1RM)	↑ ∅

Mettler et al. (2010)	20 Hommes Musculature entraînés	Régime hypocalorique de 2 semaines (60% des AET habituels) 1 g prot.kg⁻¹.j⁻¹ + Lip, 35% AET	SJ (pic de force et détente) Force maximale, haut du corps Endurance de force, haut du corps CMV au Leg extension Test de Wingate sur vélo	↑ (force relative) ↓ ↑ Ø Ø
		Régime hypocalorique de 2 semaines (60% des AET habituels) 2.3 g prot.kg⁻¹.j⁻¹ + Lip, 15% AET	SJ (pic de force et détente) Force maximale, haut du corps Endurance de force, haut du corps CMV au Leg extension Test de Wingate sur vélo	↑ (force relative) ↓ ↑ Ø Ø
Garthe et al. (2011)	11 Hommes 13 Femmes Sportifs, HN	Perte de 5% PdC avec -1.4% / semaine Durée = 5.3 ± 0.9 semaines	Sprint 40m CMJ Force maximale, Squat (1RM) Force maximale, DC (1RM) Force maximale, TC (1RM)	Ø Ø ↑ Ø Ø
		Perte de 5% PdC avec -0.7% / semaine Durée = 8.5 ± 2.2 semaines	Sprint 40m CMJ Force maximale, Squat (1RM) Force maximale, DC (1RM) Force maximale, TC (1RM)	Ø ↑ ↑ Ø ↑
Martinen et al. (2011)	16 Hommes Lutte entraînés	Perte de poids [-8% ; 0%] évaluée sur les 10 jours précédant la compétition	Test de Wingate 30s Force de préhension	Ø Ø
Paoli et al. (2012)	8 Hommes Gymnastique, HN	Régime de type « occidental » de 30 jours 47% Glu, 39% Lip, 14% Prot (9500 kJ.j⁻¹)	SJ, CMJ CMJ 15s Maximum de répétitions, pompes Maximum de répétitions, dips Maximum de répétitions, tractions	Aucune différence significative entre les 2 types de régime sur la performance
		Régime de type « cétogène » de 30 jours 5% Glu, 55% Lip, 40% Prot, (8250 kJ.j⁻¹)		
Jlid et al. (2013)	10 Hommes Lutte, HN	Perte de poids rapide de 7 jours (-7 à 8%)	Force de préhension FMI, Extenseurs du tronc Test postural dynamique (Balance test)	↓ ↓ ↓ (pied gauche)

Sawyer et al. (2013)	16 Hommes 15 Femmes Musculature, entraînés	Comparaison d'un régime traditionnel avec un régime hypoglucidique ($< 30 \text{ g.j}^{-1}$) de 7 jours Bien que le régime hypoglucidique devait être isocalorique, les auteurs ont constaté une diminution significative du PdC	CMJ Force de préhension Force maximale, Squat (1RM) Force maximale, DC (1RM) Pic de puissance, DC Test de Wingate 30s sur vélo	↑ ↑ ↑ Ø Ø Ø
Abdelmalek et al. (2015)	11 Hommes Judo, entraînés	Période de restriction calorique induisant une perte de poids de 4.2% en 7 jours	<i>Specific Judo Fitness Test</i>	↓
Cengiz (2015)	11 Hommes Lutte, entraînés	Perte de poids rapide (-5%) en 3 jours	Test de Wingate 30s, Winch Test de Wingate 30s, Vélo	Ø ↓
Helms et al. (2015)	14 Hommes Musculature, entraînés	Régime hypocalorique de 2 semaines (60% des AET habituels) 1.6 g prot.kg⁻¹.j⁻¹ + Lip, 36% AET	FMI, Tirage d'épaulé	Ø
		Régime hypocalorique de 2 semaines (60% des AET habituels) 2.8 g prot.kg⁻¹.j⁻¹ + Lip, 15% AET	FMI, Tirage d'épaulé	Ø
Robinson et al. (2015)	Etude de cas Culturisme	Accompagnement nutritionnel sur une période de 14 semaines de préparation à une compétition de culturisme	Tests isocinétiques : Force Absolue Quadriceps et IJ Force Relative Quadriceps et IJ	↓ ↑

Abréviations utilisées :

CMJ = Countermovement Jump

CMV = Contractions Maximales Volontaires

DC = Développé Couché

FMI = Force Maximale Isométrique

HN=Haut niveau

IJ = Ischio-Jambiers, musculature de la loge postérieure de la cuisse (fléchisseur du genou et extenseur de la hanche)

PdC = Poids du Corps

RFD = Rate of Force Development, donne un indice quant à la vitesse d'atteinte du pic de force.

RM = Répétition Maximale

SJ = Squat Jump

TC = Tirage Couché, mouvement de tirage allongé sur un banc horizontal pour évaluer la force de la musculature dorsale.

V. CARACTERISTIQUES ET CONTRAINTES DE L'HALTEROPHILIE

V.1. L'haltérophilie, discipline olympique

L'influence de la restriction alimentaire sur les aspects psychophysiologiques et la performance a été principalement étudiée dans les sports de combat, comme la boxe, le judo ou la lutte (Franchini et al., 2012; Hall & Lane, 2001; Pettersson et al., 2012, 2013; Steen & Brownell, 1990; Sundgot-Borgen et Garthe, 2011). Ces disciplines présentent l'inconvénient de ne pas permettre une évaluation objective du niveau de performance (Franchini et al., 2012; Marttinen et al., 2011). Dans ce contexte, l'haltérophilie nous apparaît comme une discipline permettant de répondre à ce manque.

L'haltérophilie est une discipline olympique organisée en 8 catégories de poids de corps chez les athlètes masculins et 7 catégories chez les athlètes féminines. L'objectif de l'haltérophile est de soulever une charge supérieure à ses adversaires au travers de 2 mouvements, qui sont l'arraché et l'épaulé-jeté (EJ) (Storey & Smith, 2012). Le classement final s'établit sur la base du total olympique, mesurée en kilogrammes, qui est l'addition de la meilleure performance réalisée au cours de l'un des 3 essais tentés à l'arraché et à l'EJ. Le classement suivant le coefficient Sinclair est également utilisé pour ajuster la performance absolue au poids de corps de l'haltérophile et, ainsi, comparer la performance d'haltérophiles de catégories de poids différentes.

Traditionnellement, le sportif s'entraîne à un poids de corps supérieur à la limite de sa catégorie officielle. Cette stratégie est censée lui permettre de supporter des charges d'entraînement plus importantes, favorisant le développement de son niveau de performance. A l'instar des sports de combat, les haltérophiles utilisent la restriction des apports

nutritionnels, ainsi que des méthodes de déshydratation active et/ou passive pour perdre du poids à l'approche des compétitions (Dreschler, 1998; Storey & Smith, 2012). Néanmoins, la pesée lors des compétitions d'haltérophilie se déroule le jour de l'épreuve, sur une durée d'une heure et débute deux heures avant le début de la compétition. Ces modalités imposent des contraintes temporelles différentes des sports de combat, pour lesquels la pesée a lieu la veille. Ce contexte particulier pourrait impliquer des stratégies de gestion du poids de corps différentes.

De manière empirique, les entraîneurs d'haltérophilie rapportent que la perte de poids n'a pas d'influence négative sur la performance de l'arraché, qui est le premier mouvement de la compétition. Les effets seraient plus prégnants sur la performance de l'EJ, où les athlètes arriveraient avec un niveau de fatigue avancé et pouvant être accentué par le processus de la perte de poids (Dreschler, 1998).

V.2. Facteurs de la performance en haltérophilie

La performance en haltérophilie est caractérisée par des efforts brefs et intenses, 3 à 5 secondes pour l'arraché et 8 à 12 secondes pour l'EJ, répétés 3 fois pour chaque mouvement au cours de la compétition avec des temps de récupération variables selon le contexte compétitif (Storey & Smith, 2012). Les investigations portant sur les qualités physiques des haltérophiles ont mis en avant des qualités de force et de puissance parmi les plus élevées du monde sportif (Garhammer, 1993). De plus, le développement des caractéristiques techniques du geste, en lien avec les paramètres cinétiques et cinématiques, sont d'une importance cruciale à l'atteinte de l'expertise sportive en haltérophilie (Campos, Poletaev, Cuesta, Pablos, & Carratala, 2006; Derwin, 1990; Gourgoulis, Aggeloussis, Garas, & Mavromatis, 2009; Storey & Smith, 2012).

Ces composantes de la performance en haltérophilie nécessitent un entraînement spécifique, qui se caractérise par une forte sollicitation de la composante musculaire et du système nerveux central, et qui dépasse largement les préconisations d'entraînement proposées par la littérature scientifique (Storey & Smith, 2012; Zatsiorsky & Kraemer, 2006). Au regard du rôle des apports nutritionnels dans les adaptations à l'entraînement, notamment en lien avec l'entraînement en résistance (Ahtiainen, Pakarinen, Alen, Kraemer, & Häkkinen, 2005; Phillips & Van Loon, 2011; Ratamess et al., 2003; Sharp & Pearson, 2010; Wilborn & Willoughby, 2004), la restriction des apports alimentaires pourrait nuire à la qualité des adaptations et au développement de la performance (Paillard, 2006).

V.3. **Restriction alimentaire et perte de poids en haltérophilie**

Bien qu'aucune étude n'ait porté sur les stratégies de perte de poids chez les haltérophiles, il semblerait que les modalités soient similaires à celles observées dans les sports de combat (Dreschler, 1998 ; Storey & Smith, 2012). L'utilisation d'un régime hypocalorique, associée à des stratégies de déshydratation, semblent être les moyens privilégiés par les haltérophiles (Storey & Smith, 2012). Néanmoins, le règlement technique international impose aux sportifs des contraintes temporelles différentes des sports de combat et qui ne permettent pas les mêmes stratégies de restauration alimentaire et hydrique. Dès lors, l'utilisation de l'haltérophilie, en tant que support d'études, présente l'avantage d'une mesure objective de la performance afin d'approfondir l'influence de la restriction alimentaire chez le sportif. Cette démarche permettrait également d'élargir les connaissances du monde sportif pour optimiser la préparation des haltérophiles et préserver leur intégrité physique et mentale.

VI. PROBLEMATIQUES ET HYPOTHESES

VI.1. Problématiques

La littérature scientifique décrit clairement que les méthodes de perte de poids employées par les sportifs, et notamment celles relatives à la restriction alimentaire, peuvent altérer certains indicateurs psychophysiologiques, et perturber leur intégrité physique et mentale, ainsi que leur niveau de performance. Néanmoins, la divergence des résultats ne nous permet pas, sur la base des informations actuelles, de déterminer objectivement cette influence négative, tant du point de vue de la santé du sportif, que de sa capacité de performance. Enfin, à notre connaissance, aucune information n'existe sur l'influence de la restriction alimentaire sur les adaptations psychophysiologiques et la capacité de performance chez les haltérophiles de haut niveau.

VI.2. Hypothèses

Notre étude avait pour but d'évaluer l'influence d'une restriction alimentaire rapide, conduisant à une perte de poids de 5%, sur les marqueurs salivaires de l'axe HHS et du système SAM en réponse au stress du réveil et de l'exercice, les paramètres psychologiques et le niveau de performance lors d'une compétition simulée chez des haltérophiles de haut niveau.

Nous avons émis l'hypothèse que la restriction des apports nutritionnels entraînerait (1) une dissociation de l'axe HHS et du système SAM en réponse au stress du réveil, traduisant un état de stress ; (2) une altération de la réponse hormonale à l'exercice ; et (3) une dégradation

du profil psychologique et du niveau de performance spécifique mesuré au cours d'une compétition simulée.

VII. LE PROTOCOLE EXPERIMENTAL

VII.1. Sujets

11 haltérophiles masculins âgés de 18 à 21 ans, des catégories juniors et *Under 23* (U23) selon les critères d'âge définis par la fédération européenne d'haltérophilie (*European Weightlifting Federation*, EWF), ont participé à ce protocole (Tableau 3). Ces haltérophiles faisaient partie du collectif sélectionné pour la préparation des championnats d'Europe de leur catégorie d'âge et de poids respective [-56 kg ; -94 kg]. Ils présentaient, à minima, un niveau national, selon les critères de performance établis par la Fédération Française d'Haltérophilie, Musculation, Force Athlétique et Culturisme (FFHMFAC). Ils possédaient une expérience compétitive en haltérophilie supérieure ou égale à 3 ans et s'entraînaient à raison de 5 séances hebdomadaires avec un volume horaire hebdomadaire supérieur ou égal à 12 heures. Tous les participants ont subi un examen médical et étaient soumis au suivi biologique longitudinal des sportifs de haut niveau. Ils ont également tous subi des contrôles anti-dopage au cours de la saison, dont aucun n'a été positif. Aucun haltérophile ne prenait de compléments alimentaires, de médicaments, ou ne fumait régulièrement, et aucun n'a eu de troubles endocriniens avant ou pendant l'étude. Tous les participants ont été informés, par écrit et à l'oral, des caractéristiques, des objectifs et des risques du protocole expérimental, ainsi que de l'engagement volontaire dans l'étude. Leur consentement éclairé a été recueilli avant le commencement de l'étude. Il a également été précisé que les données étaient strictement confidentielles, traitées dans le seul but scientifique et qu'elles ne seraient pas transmises et/ou utilisées par l'encadrement technique pour apprécier leur niveau de performance. Aucune compensation financière n'a été versée aux participants. Cette étude s'est déroulée en accord avec les principes éthiques fondamentaux énoncés dans la Déclaration d'Helsinki.

Tableau 3 : Caractéristiques anthropométriques des sujets au début du protocole (T₁), après 6 jours à poids constant (T₂) et après 6 jours de restriction alimentaire, pour le groupe Restriction uniquement (T₃)

	Groupe Contrôle (n=5)			Groupe Restriction (n=6)		
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₁	T ₂	T ₃
Age (années)		18.8 ± 0.8			19.8 ± 0.7	
Expérience compétitive (années)		5.6 ± 2.5			6.1 ± 2.3	
Taille (cm)		167.8 ± 9.2			169.0 ± 9.0	
Poids de corps (kg)	68.7 ± 12.5	69.0 ± 13.0	69.0 ± 12.8	76.3 ± 13.7	76.6 ± 14.6	73.3 ± 13.9**
IMC (kg/m²)	24.2 ± 1.9	24.3 ± 2.1	24.3 ± 2.1	26.5 ± 2.4	26.6 ± 2.6	25.4 ± 2.4
Masse grasse (%)	15.1 ± 5.8 [#]	15.0 ± 6.4	13.6 ± 6.8	23.1 ± 6.2	22.3 ± 6.5	20.8 ± 6.4*
Masse maigre (kg)	59.0 ± 13.9	59.3 ± 14.9	60.2 ± 15.1	59.2 ± 14.3	60.1 ± 15.5	58.5 ± 14.9

* : p < 0.05; ** : p < 0.01 (T₃ vs T₁)

; p < 0.05 (Contrôle vs Restriction)

VII.2. Description du protocole

Le protocole expérimental s'est déroulé sur un stage de préparation de 12 jours en vue des championnats d'Europe d'haltérophilie juniors et U23. A cette occasion, 11 haltérophiles étaient regroupés dans le centre national d'entraînement (Pôle France jeunes de Châtenay-Malabry). La Figure 1 décrit le déroulement du protocole expérimental.

Lors de la première phase (T₁ à T₂), d'une durée de 6 jours, l'ensemble des participants devaient maintenir leur poids de corps constant, ce qui permettait de déterminer leurs apports nutritionnels habituels. Au cours de la seconde phase (T₂ à T₃), un groupe Contrôle (n=5) devait maintenir son poids de corps constant, alors qu'un second groupe, appelé Restriction (n=6), devait réduire son poids de corps de 5% en 6 jours, sur la base d'une restriction des apports nutritionnels. L'ensemble des participants de cette étude étaient des sportifs habitués à

perdre du poids dans la période précédant la compétition. Aucun d'entre eux n'utilisait de substances illicites (laxatifs, diurétiques), ni de médicaments (coupe-faim) pour perdre du poids. Les groupes ont été constitués de manière aléatoire en prenant la performance comme référence. A la fin de chacune des périodes (T_2 à T_3), une évaluation du niveau de performance spécifique a été réalisée dans le cadre d'une compétition simulée d'haltérophilie (Figure 1). Ces 2 évaluations avaient également valeur de test de qualification en vue de la sélection aux championnats d'Europe.

Les indicateurs anthropométriques, poids et pourcentage de masse grasse, ont été mesurés au début du protocole expérimental (T_1), après 6 jours à poids constant (T_2) et après 6 jours de restriction alimentaire pour le groupe Restriction (T_3). Le poids de corps a également été mesuré le jour suivant la fin de la phase de restriction (T_4) (Figure 1). Les apports nutritionnels ont été quantifiés sur la totalité de la période expérimentale par l'intermédiaire d'un carnet alimentaire associé à des photographies des plateaux repas. La charge d'entraînement a été évaluée pour s'assurer que les participants étaient soumis à des sollicitations similaires lors de chaque période et qu'il n'y avait pas de différence entre les groupes. Les troubles alimentaires ont été appréciés par l'intermédiaire du questionnaire EAT-26 (*Eating Attitudes Test*). L'ensemble des participants présentaient un score inférieur à 20, traduisant l'absence de troubles du comportement alimentaire (Garner & Garfinkel, 1979).

A T_1 , T_2 et T_3 , des recueils d'échantillons urinaires, des capillaires sanguins et salivaires ont été réalisés au cours de la journée. Une mesure de la densité urinaire (*Urine Specific Gravity*, USG) a été effectuée sur la 1^{ère} miction du matin pour évaluer le niveau d'hydratation des participants (Pettersson & Berg, 2014; Sawka et al., 2007). Un prélèvement des capillaires sanguins a été réalisé pour mesurer la glycémie.

Des échantillons salivaires ont été recueillis pour mesurer la concentration salivaire du cortisol, de la DHEA, ainsi que l'activité enzymatique de l' α -amylase salivaire. Les prélèvements ont été effectués au réveil, 30 et 60 minutes suivant le réveil pour apprécier la réponse de ces marqueurs au stress du réveil. Les prélèvements ont également été réalisés lors d'une compétition simulée d'haltérophilie à T₂ et T₃ : lors de la pesée, après le 3^{ème} essai de l'arraché et après le 3^{ème} essai de l'épaulé-jeté (EJ) pour mesurer la réponse hormonale au stress de l'exercice.

Parallèlement aux indicateurs physiologiques, nous avons mesuré l'humeur des participants par le biais du questionnaire du POMS (McNair et al., 1971), ainsi que la perception du niveau de stress et de récupération par le questionnaire du RESTQ-Sport (Kellmann & Kallus, 2001). Les participants ont complété les 2 questionnaires à T₁, T₂ et T₃ au même horaire (11h00).

Finalement, la mesure du niveau de performance a été réalisée lors de 2 compétitions simulées d'haltérophilie, associées à un test de détente verticale (*Countermovement Jump*, CMJ). A la suite de la période à poids constant (T₂) et de la période de restriction alimentaire pour le groupe Restriction (T₃), les participants ont été évalués dans le cadre d'une compétition simulée d'haltérophilie, qui servait également de test de sélection (Figure 1). Les 2 épreuves simulées se sont déroulées conformément au règlement technique de la fédération internationale d'haltérophilie (*International Weightlifting Federation*, IWF). Pour chaque test, la meilleure performance sur le mouvement de l'arraché et la meilleure performance sur le mouvement de l'EJ, à la suite des 3 essais réglementaires, ont été retenues et additionnées pour calculer le total Olympique en kilogrammes. La meilleure performance à l'arraché et à l'EJ, ainsi que le total Olympique, ont été multipliés par le coefficient Sinclair relatif au poids

de corps du participant, pour ajuster la performance au poids de corps de l'haltérophilie. Le test de CMJ a été effectué 20 minutes avant la compétition simulée d'haltérophilie.

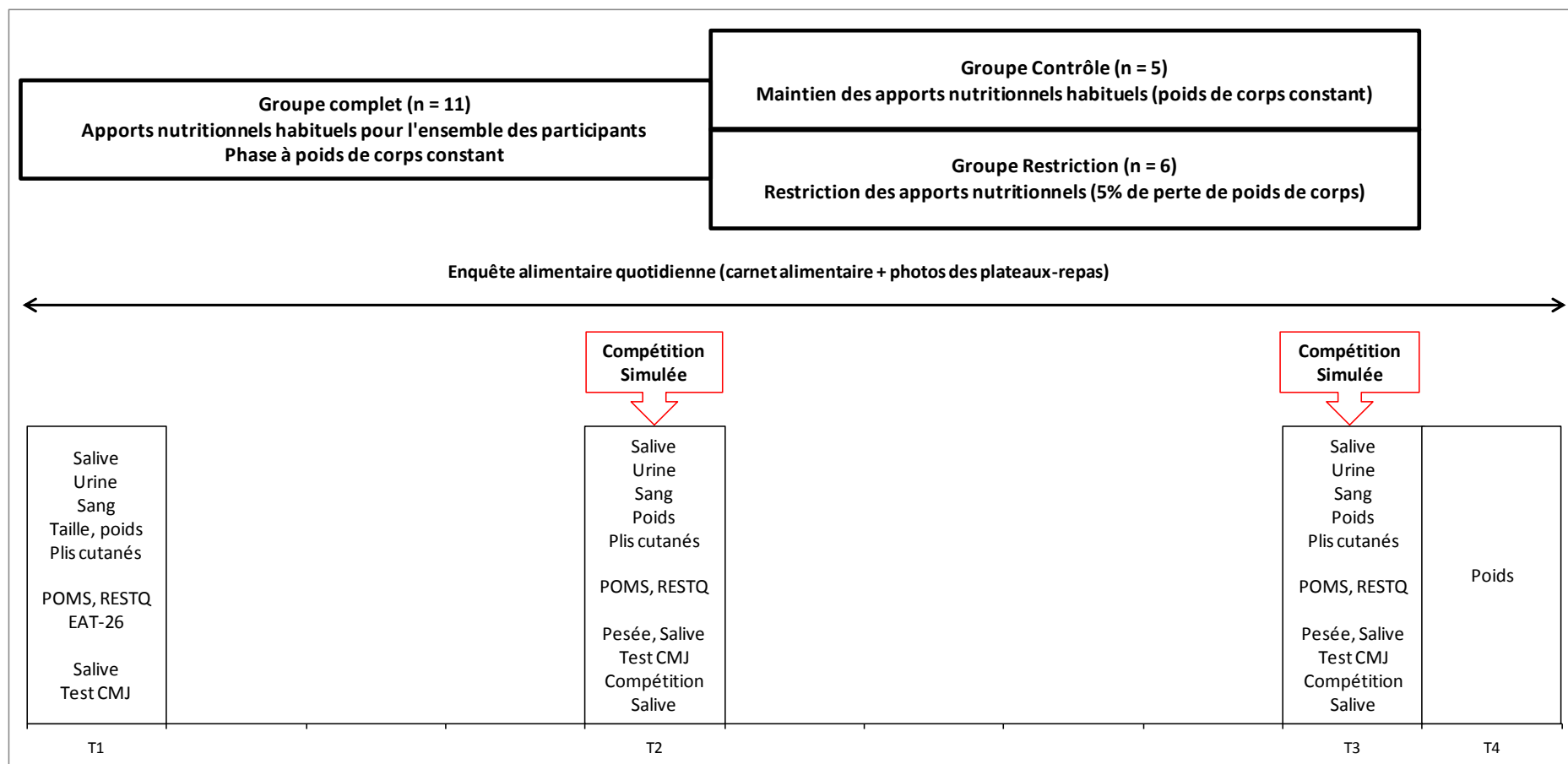


Figure 1 : Description du protocole expérimental. POMS = Profile of Mood States ; RESTQ = REcovery and STress Questionnaire; EAT-26 = Eating Attitudes Test; CMJ = Countermovement Jump

VII.3. Les paramètres anthropométriques

A T₁, la taille des sujets a été évaluée au moyen d'une toise graduée au centimètre. A T₁, T₂, T₃ et T₄, la masse corporelle a été mesurée sur une balance électronique (précision : 10 grammes) et conforme aux normes de l'IWF (Precia Molen, I 200B). Les sportifs étaient pesés pieds nus et en sous-vêtements. Les mesures ont été réalisées au réveil (7h30) après la 1^{ère} miction. A T₂ et T₃, lors des compétitions simulées, les haltérophiles ont également été pesés 2 heures avant le commencement de l'épreuve (14h00), conformément aux modalités d'une compétition officielle. La pince à plis cutanés Harpenden (Harpenden Skinfold Caliper) a été utilisée pour mesurer l'épaisseur des 4 plis, i.e. biceps, triceps, sous-scapulaire et supra-iliaque, à T₁, T₂ et T₃ et déterminer le pourcentage de masse grasse (Durnin & Rahaman, 1967). Les mesures ont été effectuées selon le protocole de la *International Society for the Advancement of Kinanthropometry* (ISAK). Un membre expérimenté de l'équipe de recherche a recueilli l'ensemble des valeurs. Les mesures ont été réalisées sur le côté droit du corps avec l'haltérophile se tenant debout et détendu. Chaque pli cutané a été estimé à 0,1 mm près. Trois mesures ont été effectuées à chaque site. Les valeurs moyennées de chaque point de mesure ont été additionnées pour déterminer le pourcentage de masse grasse. L'horaire de la mesure a été standardisé pour tenir compte des variations diurnes (14h00).

VII.4. Le comportement alimentaire

a) Evaluation des troubles du comportement alimentaire

La version française du questionnaire auto-administré EAT-26 (*Eating Attitudes Test*), précédemment validée (Leichner, Steiger, Puentes-Neuman, Perreault, & Gottheil, 1994), a été utilisée pour identifier les troubles du comportement alimentaire. Un score global

supérieur à 20 est considéré comme un indicateur de la présence de troubles du comportement alimentaire (Garner & Garfinkel, 1979). Or, des pathologies relatives au comportement alimentaire, comme l'anorexie nerveuse, ont été associées à une altération des concentrations salivaires du cortisol, de la DHEA et de l' α -amylase (Filaire et al., 2015; Monteleone et al., 2011; Oskis, Loveday, Hucklebridge, Thorn, et al., 2012; Oskis, Loveday, Hucklebridge, Wood, et al., 2012).

Le questionnaire du EAT-26 contient 26 items issus du questionnaire original (EAT-40, Garner & Garfinkel, 1979) et relatifs à la thématique de la restriction, de la boulimie et de la préoccupation vis-à-vis de la nourriture, ainsi que du contrôle oral. Il était demandé aux participants de coter leur approbation par rapport à des préoccupations concernant leur perception de leur poids de corps et de leur comportement alimentaire sur une échelle de 6 points : de 1 correspondant à « toujours » à 6 à « jamais ». A titre d'exemple, le thème « restriction » décrit un comportement orienté sur l'exclusion d'aliments riches en calories et des préoccupations relatives à la minceur. Les items « J'aime essayer des aliments nouveaux et riches » et « Je suis terrifié(e) à l'idée d'être en surpoids » sont des exemples illustrant cette thématique. L'addition des points correspondant à chaque thématique détermine un score spécifique. L'addition du score de chacune des catégories permet de définir le score global. Le questionnaire EAT-26 a été complété à T₁, au même moment que les questionnaires du POMS et du RESTQ. Aucun des participants de l'étude ne présentait un score global supérieur à 20.

b) La quantification des apports nutritionnels

Les apports nutritionnels ont été mesurés lors d'une période à poids constant de 6 jours et à la suite d'une période de restriction alimentaire de 6 jours. Aucune préconisation d'ordre nutritionnelle n'a été fournie aux participants et le régime alimentaire correspondait aux

habitudes alimentaires utilisées par les haltérophiles avant les compétitions. L'ensemble des participants a reçu une explication verbale détaillée et des instructions écrites quant au recueil des données relatives aux apports nutritionnels.

Deux procédures ont été utilisées pour évaluer les apports alimentaires. (1) Il a été demandé aux athlètes d'être aussi précis que possible pour indiquer la quantité et le type d'aliments et de boissons consommés. Ils ont été invités à enregistrer la marque de tous les aliments commerciaux et prêts à consommer, ainsi que les méthodes de préparation. Une liste indicative des mesures communément utilisées a été fournie à chaque participant. Toutes les questions, ambiguïtés ou omissions concernant le type et la quantité d'aliments et de boissons consommés ont été résolues au cours d'entretiens individuels quotidiens. (2) Des photographies des plateaux repas ont été réalisées avant et après les 3 principaux repas de la journée (petit-déjeuner, déjeuner et dîner) par l'un des membres de l'équipe scientifique (Figure 2). Cette deuxième procédure a permis de contrôler les quantités rapportées par les athlètes et éviter, autant que possible, la sous-estimation généralement constatée chez les populations sportives (Aerenhouts, Deriemaeker, Hebbelinck, & Clarys, 2011). Nous avons eu recours au catalogue photographique SU-VI-MAX, répertoriant une large gamme d'aliments couramment consommés, ainsi que différentes portions, pour estimer, sur la base de la comparaison des photographies, les quantités réellement consommées par les participants. Les apports énergétiques quotidiens, ainsi que les apports en macro- et micronutriments ont été calculés par le logiciel informatique Nutrilog® version 2.31 (Nutrilog SAS, France).



Figure 2 : Illustration de photographies prises avant et après un repas pour quantifier les apports nutritionnels du participant, identifié à l'aide d'une étiquette indiquée par le cercle rouge sur la photo

VII.5. La charge d'entraînement

La charge d'entraînement a été évaluée au moyen de la méthode de Foster (Foster, 1998; Foster et al., 2001), qui associe la durée de la séance d'entraînement (en minutes) à la perception de la difficulté par l'athlète (*Rate of Perceived Exertion*, RPE). Cette difficulté perçue était évaluée par l'intermédiaire de l'échelle de Borg (Borg, 1990) notée de 1 à 10. Trente minutes suivant la fin de la séance d'entraînement, il était demandé à chaque participant de coter la difficulté de la séance par la question suivante « Quelle a été la difficulté de la séance d'entraînement ? » (Foster, 1998; Foster et al., 2001). Le produit de la durée de la séance, par la difficulté perçue permet d'estimer la charge d'entraînement, également appelée *training load*. Lorsque 2 séances avaient lieu le même jour, la charge d'entraînement de chacune des séances étaient additionnées afin de déterminer la charge d'entraînement globale de la journée. La Figure 3 représente la charge d'entraînement effectuée par chaque groupe lors de la période à poids constant et lors de la période de restriction alimentaire. Aucune variation significative n'a été observée entre les groupes ou entre les périodes (Figure 3).

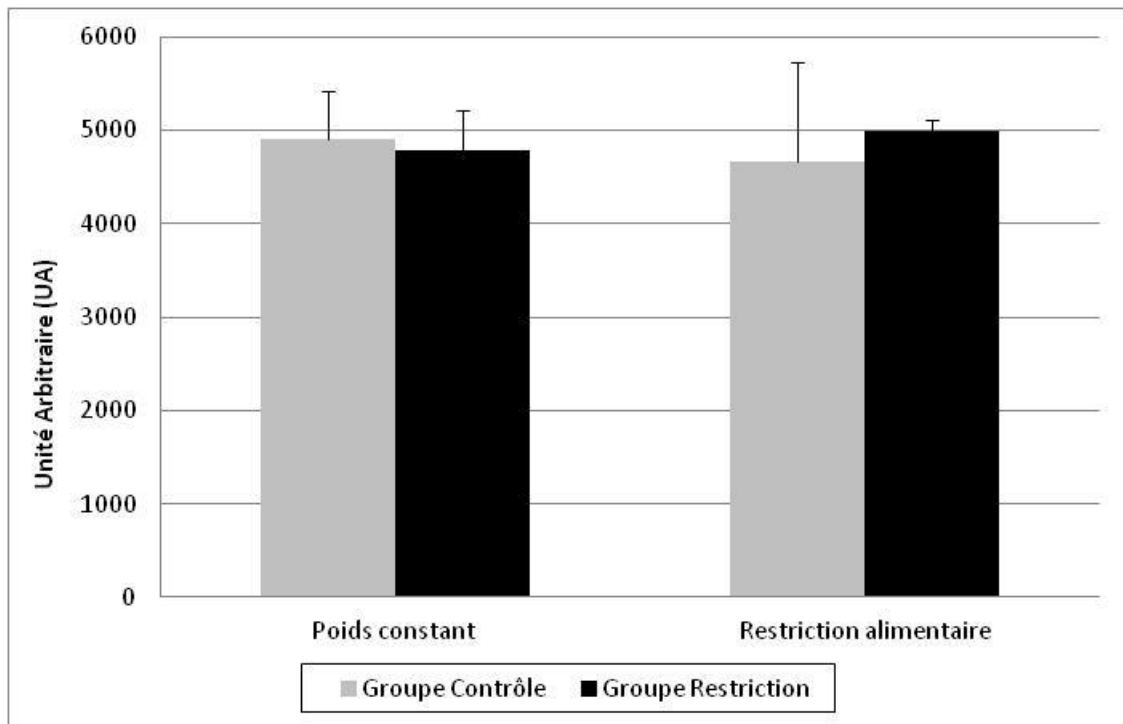


Figure 3 : Quantification de la charge d'entraînement en fonction de la période et du groupe

VII.6. Les indicateurs physiologiques

a) Les prélèvements urinaires

A T_1 , T_2 et T_3 , les sujets ont fourni un échantillon d'urine, à leur réveil, dans un récipient approprié pour déterminer leur niveau d'hydratation (Pettersson & Berg, 2014; Sawka et al., 2007). Les échantillons d'urine ont été analysés sur place en utilisant des bandelettes réactives d'analyse urinaire (Mission Urinalysis Reagent Strips, ACON Laboratories, Inc., San Diego, USA). La comparaison de la coloration de la bandelette avec le référentiel fourni par le fabricant permettait de définir simultanément le pH et la densité urinaire (USG) de l'échantillon. Les valeurs de 1.020 et 1.030 ont été définies comme les seuils permettant de déterminer un état de déshydratation et un état de déshydratation sévère, respectivement (Pettersson & Berg, 2014).

b) Les prélèvements de sang capillaire

A T_1 , T_2 et T_3 , un prélèvement de sang capillaire a été effectué au niveau du doigt afin d'observer les paramètres métaboliques (glycémie) et biochimiques (natrémie, kaliémie, calcémie). Les prélèvements ont été effectués au réveil et à jeûn, et analysés sur place par l'intermédiaire d'un appareil EPOC[®] (Alere SAS, Jouy-en-Josas, France) (Figure 4).

Le Tableau 4 présente les valeurs des indicateurs métaboliques et biochimiques mesurées au début de l'expérimentation (T_1), après 6 jours à poids constant (T_2) et après 6 jours de restriction alimentaire (T_3). Les prélèvements ont été effectués par un personnel médical qualifié et membre de l'équipe de recherche.



Figure 4 : Modalités de prélèvement et de traitement des échantillons de capillaires sanguins

Tableau 4 : Evolution de la glycémie et des indicateurs biochimiques (natrémie, kaliémie et calcémie) au début du protocole (T₁), après 6 jours à poids constant (T₂) et après 6 jours de restriction alimentaire, pour le groupe Restriction uniquement (T₃). Les valeurs sont présentées en moyenne $\pm$ ET

Points de mesure	Groupe Contrôle (n=5)			Groupe Restriction (n=6)		
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₁	T ₂	T ₃
Glycémie (mg.dl⁻¹)	86.6 $\pm$ 3.7	88.4 $\pm$ 4.2	90.2 $\pm$ 5.6	94.2 $\pm$ 6.7	87.8 $\pm$ 12.8	85.7 $\pm$ 9.7*
Natrémie (mmol.l⁻¹)	141.0 $\pm$ 1.6	140.0 $\pm$ 1.6	140.4 $\pm$ 1.1	141.0 $\pm$ 2.1	140.7 $\pm$ 1.4	141.0 $\pm$ 2.0
Kaliémie (mmol.l⁻¹)	5.4 $\pm$ 1.1	4.9 $\pm$ 0.6	5.4 $\pm$ 0.7	5.4 $\pm$ 0.9	4.8 $\pm$ 0.3	5.0 $\pm$ 0.8
Calcémie (mmol.l⁻¹)	1.3 $\pm$ 0.1	1.2 $\pm$ 0.1	1.2 $\pm$ 0.1	1.2 $\pm$ 0.1	1.2 $\pm$ 0.1	1.2 $\pm$ 0.1

* indique une différence significative avec T₁ (p < 0.05)

c) Les prélèvements salivaires

Des échantillons salivaires ont été recueillis afin de mesurer les concentrations salivaires du cortisol, de la DHEA, ainsi que l'activité de l' α -amylase. Au début du protocole expérimental (T₁), l'ensemble des participants a été informé des procédures relatives au recueil des échantillons salivaires. La salive a été recueillie par salivation passive (*passive drooling*) pendant 3 minutes dans un tube Eppendorf en plastique.

✓ *Les réponses au réveil*

A T₁, T₂ et T₃, les participants devaient recueillir trois échantillons salivaires le matin (1) immédiatement après le réveil, (2) 30 minutes et (3) 60 minutes après le réveil. L'horaire et la durée du prélèvement ont été supervisés par l'un des membres de l'équipe de recherche. Ce dernier récupérait les échantillons salivaires à chaque point de mesure (i.e. réveil, 30 et 60 minutes post) pour contrôler l'horaire et le volume du prélèvement, et vérifier la présence éventuelle de traces de sang (Gatti & De Palo, 2011). Les échantillons ont été aliquotés sur place (Figure 5), puis stockés à -4°C avant d'être transportés au laboratoire de l'Institut de

Recherche Biomédicale des Armées (IRBA), où ils ont été stockés à -20°C jusqu'à leur analyse.



Figure 5 : Illustration de la phase d'aliquotage des échantillons salivaires

A T_1 , T_2 et T_3 , les participants ont été réveillés à 7h30 en utilisant leur propre réveil. Il leur était demandé de recueillir le premier échantillon de salive immédiatement après le réveil et de se lever par la suite. Ils n'avaient pas le droit de manger, ni de boire ou de se brosser les dents durant les 30 minutes précédant le prélèvement. Les sujets ont été informés de se rincer la bouche avec de l'eau et d'avaler le premier flux de salive avant de commencer le recueil. Ils devaient ensuite laisser la salive s'accumuler dans la bouche avant de la laisser s'écouler dans le tube fourni par l'équipe scientifique. Afin de respecter les critères de prélèvement pour le premier échantillon de la journée, le tube de salivation était fourni la veille. Après le recueil du 1^{er} échantillon, le participant rapportait le prélèvement à l'un des membres de l'équipe de recherche pour contrôle et stockage. Ces instructions ont été répétées la veille de chaque prélèvement par les membres de l'équipe de recherche présents sur les lieux du stage. Ces dispositions avaient pour but de s'assurer de la bonne conformité du déroulement du protocole expérimental. Aucune autre directive n'a été donnée pouvant interférer avec les habitudes quotidiennes des participants.

✓ *Les réponses à l'exercice*

Lors des jours de compétition simulée (T_2 et T_3), les haltérophiles devaient fournir un échantillon de salive (1) au moment de la pesée précompétitive (14h00-14h15), (2) immédiatement après le 3^{ème} essai du mouvement de l'arraché (16h45-17h00) et (3) immédiatement après le 3^{ème} essai du mouvement de l'EJ (17h45-18h00). A T_1 , il était également demandé aux participants de fournir un échantillon salivaire à 14h00 servant de point de référence. Les modalités de recueil des échantillons étaient similaires à celles décrites pour les prélèvements du matin. L'horaire et la durée du prélèvement étaient contrôlés par l'un des membres de l'équipe de recherche. Les échantillons ont été aliquotés sur place, puis stockés à -4°C avant d'être transportés au laboratoire de l'Institut de Recherche Biomédicale des Armées (IRBA), où ils ont été stockés à -20° C jusqu'à leur analyse.

VII.7. **Les paramètres psychologiques**

A T_1 , T_2 et T_3 , les participants ont complété le questionnaire du POMS (McNair et al., 1971), permettant d'évaluer l'humeur (voir III.1.a). Le questionnaire du RESTQ-Sport (Kellmann & Kallus, 2001), permettant d'évaluer la perception du niveau de stress et de récupération des sujets (voir III.1.b), a été complété en même temps que le questionnaire du POMS (11h00).

VII.8. **La performance**

L'influence de la restriction alimentaire sur la performance a été mesurée lors de 2 compétitions simulées d'haltérophilie, associées à un test de détente verticale avec contre-mouvement (CMJ).

a) La compétition simulée d'haltérophilie

A la suite de la période à poids constant (T_2) et de la période de restriction alimentaire (T_3), une compétition simulée d'haltérophilie a été organisée pour évaluer le niveau de performance spécifique. Ce test reproduisait les conditions règlementaires et matérielles d'une compétition officielle. La meilleure performance sur le mouvement de l'arraché et la meilleure performance sur le mouvement de l'EJ ont été retenues, après les 3 essais règlementaires, et additionnées pour obtenir le total Olympique. Conformément à la réglementation internationale, une période de pesée d'une heure était fixée 2 heures avant le début de l'épreuve à T_2 et T_3 (14h00).

Les sujets ont effectué leur échauffement habituel, consistant en 5 minutes de mobilisation articulaire suivies de 5 minutes d'échauffement spécifique. Au cours de cette phase, les athlètes réalisaient des mouvements de squats, de développés et d'arraché ou d'épaulé-jeté avec la barre de compétition (20 kg). Les athlètes procédaient ensuite à une incrémentation progressive de la charge, de 30% jusqu'à 90% de leur charge maximale. Cette stratégie permettait de se préparer pour un 1^{er} essai programmé, approximativement, à 95% du record de l'athlète. L'ensemble de l'épreuve était supervisé par les 2 entraîneurs nationaux, qui apportaient les consignes, les encouragements et les régulations techniques nécessaires. Les 2 épreuves ont été réalisées aux mêmes horaires et dans des conditions similaires (salle, matériel, température). La meilleure performance sur chacun des mouvements et le total olympique ont été multipliés par l'indice Sinclair (<http://www.iwf.net/weightlifting/sinclair-coefficient/>). Ce résultat permet une pondération de la performance absolue, mesurée en kilogrammes, en fonction du poids de corps de l'haltérophile et offre la possibilité d'une comparaison intra- et interindividuelle.

b) Le test de détente verticale (CMJ)

Nous avons également procédé à une évaluation de la puissance musculaire du membre inférieur sur la base de la performance réalisée lors d'un test de détente verticale avec contre-mouvement, appelé *Countermovement Jump* (CMJ). La hauteur du saut a été mesurée grâce au dispositif Optojump® (Microgate, Bolzano, Italie) (Castagna et al., 2013; Glatthorn, Gouge, Nussbaumer, Impellizeri, & Maffiuletti, 2011). Ce test a été réalisé à T₁ après une période de 48 heures de récupération afin d'obtenir une valeur de référence. De la même manière, le test de détente a été réalisé 20 minutes avant le début de la compétition simulée à T₂ et T₃. Chaque test a été effectué après un échauffement adapté et standardisé de 5 minutes précédemment détaillé. Par la suite, les sujets se voyaient expliquer les consignes inhérentes au protocole, avant d'effectuer une série de 3 sauts pour conclure la phase d'échauffement.

Il était demandé aux participants de placer leurs mains sur les hanches et de les conserver ainsi sur toute la durée du saut et du protocole. L'amplitude de la flexion des genoux lors du contre-mouvement était libre et il était demandé aux participants de conserver les genoux tendus lors de la phase de suspension. Lors de la phase de contact, les sujets devaient se réceptionner avec les 2 pieds et fléchir les genoux pour amortir l'impact. Le non-respect de ces critères techniques entraînait une annulation de la performance. Les sujets se positionnaient au centre du dispositif d'évaluation. Ils devaient réaliser 3 sauts espacés d'une phase de récupération de 20 secondes (Kamandulis et al., 2012). Des encouragements verbaux ont été adressés aux sujets, sans fournir d'information quant à la performance atteinte. La procédure d'évaluation a été dirigée par le même expérimentateur durant toute la durée du protocole. Pour chaque évaluation, la meilleure performance (i.e. hauteur maximale en cm) a été retenue pour analyse.

VII.9. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel SPSS/PC, version 20.0 pour Windows (Chicago, IL, USA). Sauf mention contraire, les données sont présentées en tant que moyenne et écart-type (ET). Le seuil de significativité a été fixé à $p < 0.05$.

Préalablement, une vérification de la normalité de la distribution des données a été effectuée par le test de Kolmogorov-Smirnov. En l'absence d'une distribution normale, des tests statistiques non-paramétriques ont été utilisés. Le test du U de Mann-Whitney a été utilisé pour les comparaisons intergroupes (groupe Contrôle vs groupe Restriction). Le test de Friedman a été utilisé pour les analyses de variance. Lorsque le résultat était significatif, le test *post-hoc* de Wilcoxon, basé sur les rangs, était utilisé pour vérifier les données 2 à 2 dans un même groupe. Afin de déterminer la taille de l'effet, le d de Cohen a été calculé. Les seuils de <0.2 , <0.6 , <1.2 , < 2.0 , > 2.0 ont été utilisés pour définir un effet interprété comme trivial, faible, modéré, important et très important ; respectivement (Hopkins, 2006). Les corrélations ont été mesurées en utilisant le test du Rho de Spearman.

a) Le calcul des réponses au réveil

Les réponses au réveil ont été calculées avec la méthode du Delta Score, basée sur la différence entre la valeur observée 30 minutes post-réveil et la valeur de réveil. Cette méthode est considérée comme la plus simple pour évaluer la réponse au réveil (Rohleder & Nater, 2009) et a également été utilisée par de précédentes études (Filaire et al., 2013, 2015; Kunz-Ebrecht et al., 2004; Spiegel et al., 2006; Tomiyama et al., 2010). La valeur de l'AUCg, qui correspond à l'aire sous la courbe en référence à l'axe des abscisses, a été calculée en utilisant les 3 points de prélèvement du matin (7h30, 8h00, 8h30) selon la formule de Pruessner et al.

(2003) (Équation 1). Ces valeurs ont été utilisées pour définir les ratios $\alpha\text{-amylase}/\text{Cortisol}$ et $\text{Cortisol}/\text{DHEA}$.

Équation 1 : Formule de calcul de l'aire sous la courbe selon Pruessner et al. (2003), où n représente le nombre total de mesures réalisées et m_i représente un point de mesure individuel

$$AUC_G = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(m_{(i+1)} + m_i)}{2}$$

b) Le calcul des réponses à l'exercice

La réponse physiologique au stress de l'exercice a été calculée avec la méthode du Delta Score, basée sur la différence entre les valeurs post-exercice (i.e. post-arraché et post-EJ) et la valeur de pesée (Le Panse et al., 2010, 2012). La valeur de l'AUCg, qui correspond à l'aire sous la courbe en référence à l'axe des abscisses, a été calculée en utilisant les 3 points de prélèvement (i.e. pesée, post-arraché et post-EJ) selon la formule de Pruessner et al. (2003) (Équation 1). Ces valeurs ont été utilisées pour définir le ratio $\alpha\text{-amylase}/\text{Cortisol}$.

**VIII. ARTICLE 1 : INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE
SUR LA PERFORMANCE ET LES PARAMETRES
PSYCHOLOGIQUES CHEZ DES HALTEROPHILES DE HAUT
NIVEAU**

Weight loss, performance and psychological related states in high-level weightlifters

Durguerian, A., Bougard, C., Drogou, C., Sauvet, F., Chennaoui, M., & Filaire, E.

International Journal of Sports Medicine, 2016, 27(3): 230-238

INTRODUCTION

Weightlifting is an Olympic sport that is practised worldwide. Olympic weightlifting competitions are organized according to weight class, which is also the case for combat sports. It is a dynamic strength and power discipline, in which two different whole-body lifts (snatch and clean & jerk) are performed sequentially. The overall performance of weightlifters is influenced by a variety of anthropometric, technical and physiological characteristics (Storey & Smith, 2012). Besides these parameters, dietary regimes and dietary restriction have important influences. In fact, the weight classification often leads weightlifters to reduce mass or “cut weight (Storey & Smith, 2012). According to the literature, this losing of weight before the official weigh-in can exceed 5% of the total body mass in judo (Artioli, Gualano, et al., 2010), and up to 13% among wrestlers (Steen & Brownell, 1990). However, to the best of our knowledge, no published scientific research is available on Olympic weightlifting. Nevertheless, anecdotal evidence suggests they typically lose weight rapidly by a reduction in food intake for at least 5 days prior to a competition through passive water loss (sauna) to promote water loss, or even by restricting fluid consumption, as it is the case in judo (Storey & Smith, 2012). Although the negative effect of rapid weight loss on several physiological processes is well known (Artioli, Iglesias, et al., 2010; Bijlani & Sharma, 1980; Brownell, Steen, & Wilmore, 1987; Horswill et al., 1990; Too, Wakayama, Locati, & Landwer, 1998), the impact of rapid weight loss on anaerobic competitive performance remains controversial (Degoutte et al., 2006; Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001; Jlid et al., 2013; Koral & Dosseville, 2009; Marttinen et al., 2011; Rankin, Ocel, & Craft, 1996). Performance during maximal strength tests (Mero et al., 2010; Viitasalo et al., 1987) and isometric hand grip test (Degoutte et al., 2006), which are specific weightlifting tasks, was found to be affected after a food restriction and dehydration period, while no alteration have been observed in other studies (Artioli, Iglesias, et al., 2010;

Fogelholm et al., 1993; Hall & Lane, 2001; Marttinen et al., 2011). These discrepancies are due to the fact that many of these previous studies failed to collect data during a competition, or used a 5 hours recovery and/or refeeding time before testing. Other limitations included standardized diets (Horswill et al., 1990) or exercise protocols which were not focused specifically on the muscular groups that were solicited in competition (Rankin et al., 1996).

Considering the psychological aspects of weight loss in athletes, Petterson et al. (2013) have reported that athletes consider acute weight loss as a mentally important part of the pre-competition preparation, even if it has been shown that rapid weight loss alters perceived exertion and mood by increasing tension, anger, fatigue, and confusion and decreasing vigour (Choma, Sforzo, & Keller, 1998; Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001; Hall & Lane, 2001; Jlid et al., 2013; Marttinen et al., 2011). These alterations depend on dietary strategy to make weight (Wilson et al., 2012); this temporarily reduced mental state could be an outcome of the various physiological effects induced by weight regulation, such as dehydration and hypoglycaemia (Pettersson & Berg, 2014; Pettersson et al., 2012). Nevertheless, the effects of energy restriction on mood are still in debate (Foster et al., 1992; Wilson et al., 2014). Moreover, it was suggested that a deprivation of energy and nutrients during acute weight loss may put these athletes at increased risk of vitamin deficiencies (Reljic et al., 2015; Woolf & Manore, 2006). Some of them, particularly B-vitamins, play an essential role in synthesis reactions for neurotransmitters and structural elements of neurons (Loria-Kohen et al., 2013). Supplementation of complex B-vitamins among healthy subjects was found to positively influence cognitive performance and mood state (Angelo, Drake, & Frei, 2015; Loria-Kohen et al., 2013). Therefore, reduction of B-vitamins intakes, induced by rapid weight loss, could negatively influence cognitive functions and alter mood states profile. In a recent study, blood vitamin concentrations remained within or were even above the normal ranges despite a rapid weight loss after 5 days of severe dietary restriction in elite boxers, inducing a significant

reduction of vitamins intakes (Reljic et al., 2015). No or only weak correlations between the ingestion of vitamins and the respective blood concentrations were found in several studies (Fogelholm et al., 1993; Reljic et al., 2015), mainly because of the complexity of factors such as absorption, bioavailability, transfer, storage (Millet, Guillard, Fuchs, & Klepping, 1989).

Based on research findings, guidelines regarding rapid weight loss have emerged. Burke (Burke, 2007) reported a maximum weight reduction of 2% to 3% of total body weight if undertaken with sufficient sport nutrition and hydration practices. Despite these recommendations and the athletes' and coaches' knowledge about the negative impact of rapid weight loss on performance, this practice is still widespread (Pettersson et al., 2013).

According to the international rules of Olympic weightlifting the official weigh-in of competitors takes place 2 hours before the beginning, during which they can eat and drink ad libitum prior to the first attempt. The question is whether this time is sufficient to recover their physical performance during this limited time interval, this time interval being much shorter than in judo or wrestling (Timpmann et al., 2012). Therefore, the purpose of the present investigation was to mimic a typical major weightlifting championship framework to evaluate the effect of the nutritional strategy used by the competitors to lose weight on the performance and psychological responses just before the competition. We hypothesized that rapid weight loss would induce an energy deficit and inadequate vitamin intakes, which could induce alterations in performance and mood state.

MATERIALS AND METHODS

Subjects

After receiving verbal and written explanation of the purpose, procedures and possible risks of the investigation, eleven international weightlifters gave their written informed consent to

participate in this investigation. Table 1 shows the main characteristics of the participants. Exclusion criteria included regular use of laxatives, diuretics or diet pills.

All subjects were part of the French national team preparing for the European junior weightlifting championships and had competed for at least 5 years. They were only allowed to participate in the study if they had previously practiced rapid weight reduction of their own volition more than three times in a season. All participated in twelve hours of training per week. They had a follow-up medical examination, including analyses of blood samples for hormonal and biochemical parameters. No participants were taking any drugs or medication or taking any supplements, and none had a history of endocrine disorders before or during the study. All procedures were approved by the local Ethical Committee. Our study was also carried out according to the ethical standards of the International Journal of Sports Medicine (Harriss & Atkinson, 2013).

Table 1 : Age, competitive weightlifting experience and body composition for control (Group 1) and diet (Group 2) groups at T₁ (weight maintenance, and after a 6-d food restriction for Group 2 (T₂), the morning of a simulated competition (mean $\pm$ SD).

	Group 1 (n=5)		Group 2 (n=6)	
	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂
Age (years)	18.8 $\pm$ 0.8		19.8 $\pm$ 0.7	
Weightlifting experience (years)	5.6 $\pm$ 2.5		6.1 $\pm$ 2.3	
Height (cm)	167.8 $\pm$ 9.23		169.0 $\pm$ 9.0	
Bodyweight (kg)	68.9 $\pm$ 12.9	69.0 $\pm$ 12.8	76.6 $\pm$ 14.5	73.3 $\pm$ 13.9**(S)
BMI (kg/m²)	24.2 $\pm$ 2.1	24.2 $\pm$ 2.0	26.5 $\pm$ 2.6	25.4 $\pm$ 2.4
% body fat	14.9 $\pm$ 6.4	13.6 $\pm$ 6.8	22.2 $\pm$ 6.4	20.8 $\pm$ 6.4*(T)
FFM (kg)	59.2 $\pm$ 14.8	60.2 $\pm$ 15.1	60.1 $\pm$ 15.4	58.5 $\pm$ 14.8*(T)

* : $p < 0.05$; ** : $p < 0.01$ (T₂ vs T₁)

(T) indicates a trivial effect size and (S) indicates a small effect size (T₂ vs T₁)

Experimental design

Six days before the beginning of the experimentation, subjects were randomly allocated into each group (1 and 2) in a counterbalanced design using the weightlifting performance with reference. Then, all members of Group 2 (called diet) were asked to lose about an average of 5% of their body weight through self-determined means during 6 days. The self-determined means were at the discretion of each individual. However, post hoc analysis revealed energy and fluid restrictions (-41% and -30%, respectively), and a bodyweight reduction of 4.34%. All members of Group 1 (called Control) were asked to maintain their body weight. Assessments (weight, performance, psychological tests) were made during a period of weight maintenance, the morning of a simulated competition (T_1), and after a 6-d food restriction, during the morning of the same simulated competition (T_2). According to the International Weightlifting Federation technical rules, the weigh-in took place 2 hours before the beginning of the competition. The experimental timeline is presented in Figure 1.

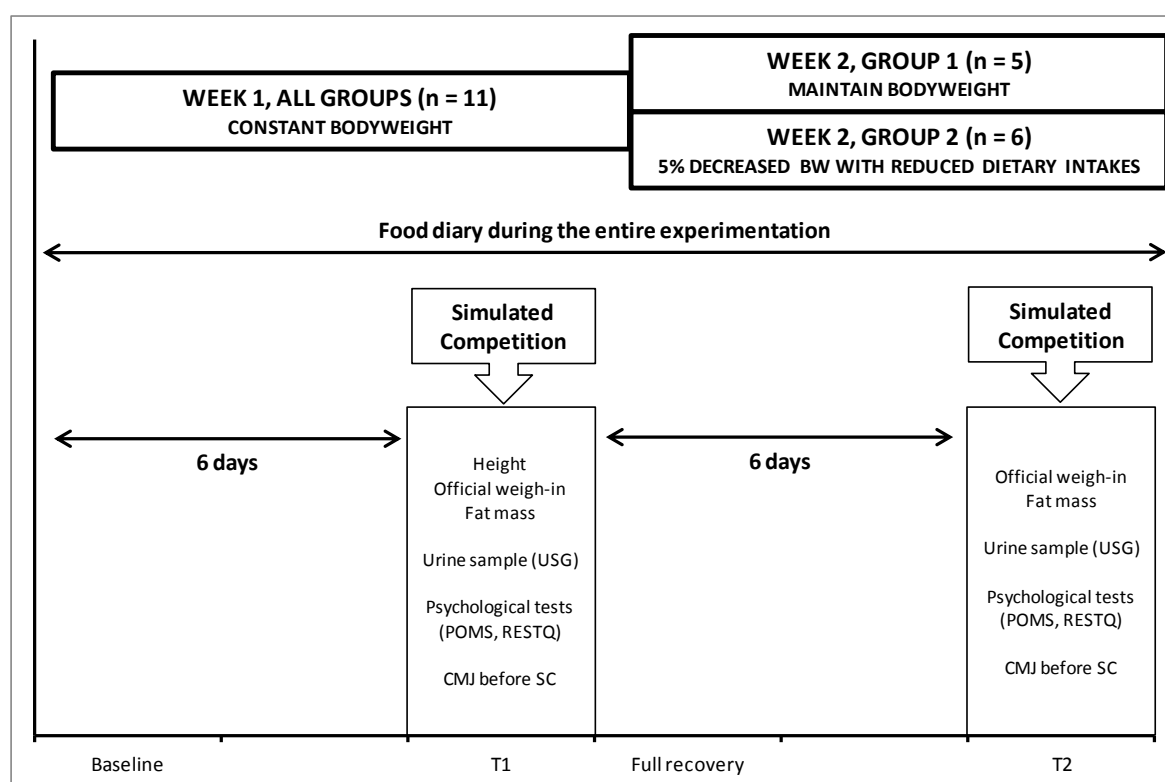


Figure 1 : Experimental timeline. The test battery was performed during a period of weight maintenance (T_1), after a 6-d food restriction (T_2).

The period of weight maintenance was considered as baseline and weightlifters performed their regular regimens of weightlifting. The first food record evaluation was realized during this period, 6 days before T_1 . Weightlifting training sessions normally lasted 75 to 90 minutes and consisted of technical exercises with Olympic snatch and clean and jerk lifts and weightlifting technical assistance exercises (i.e., movements from hanging position or from blocks) and strength exercises (squats, pulls and strengthening exercises). Weightlifting movements were typically realized for 1 to 3 repetitions with intensity between 70 and 100% of competition maximum. Squats and pulls were characterized by sets of 2 to 4 repetitions at 90-110% of the corresponding weightlifting lift's maximum performance. Exactly the same training program was done during the 6-d weight restriction. Both simulated competitive events were realized at the same time of the day to account for diurnal variations, after 24h of total recovery.

Anthropometric measurements

The weight and height of each subject were measured and the percentage of body fat mass was estimated from four measurements of skinfold thickness according to Durnin & Rahaman (1967). For all the athletes, body mass was recorded at T_1 and T_2 to the nearest 0.1 kg using a portable digital scale (PreciaMolen, I 200B, Precia SA, Privas, France) each athlete wearing light clothing and no footwear. Height was measured to the nearest 0.1cm with an anthropometric plane only at T_1 . A Harpenden calliper (Harpenden Skinfold Caliper) was used to measure the skinfold thickness, i.e. biceps, triceps, subscapular and suprailiac. Measurements were taken according to the protocol of the International Society for the Advancement of Kinanthropometry. To avoid inter-observer disagreement, the same experienced exercise scientist collected at T_1 and T_2 all skinfold measurements taken on the right side of the body with the athlete standing up and relaxed. Each skinfold was estimated to

0.1mm. The time of day was recorded to account for diurnal variations. Measurements were taken 2s after full pressure was applied. Three measurements were taken at each site and averaged.

Physical performance measures

In order to evaluate the performance of each subject, we have chosen a simulated Olympic weightlifting competition test and a countermovement jump (CMJ) test, which measures lower-limb explosive strength (Markovic, Dizdr, Jukic, & Cardinale, 2004).

At T_1 and T_2 , lifters started their warm-up routine 30 minutes before the start of the simulated competition. Warm-up consisted of 10 minutes of general muscular activation using multiple bodyweight and stretching exercises and 20 minutes of specific warm-up for the lift concerned. During this specific phase lifters progressively raised the load from 30 to 90% of their maximum to get ready for the first attempt programmed at 95% of lifter's maximum. Mean recovery length between each competitive attempt was 3.33 minutes. Warm-up and simulated competition were entirely supervised by certified coaches, members of the technical staff of the national junior weightlifting team. Each test reproduced the conditions of a regular weightlifting competitive event and was judged by an official referee of the French Weightlifting Federation to assess the validity of each attempt. The best performance on each movement was retained after 3 regular attempts and summed up to obtain the Olympic total, which represents the benchmark performance in weightlifting competitions. Weightlifting performance was also quantified using the Sinclair coefficient, updated for the 2013-2016 period (http://www.iwf.net/weightlifting_/sinclair-coefficient/). The coefficient values are presented in the Table 2 for each group and each time.

Between the weigh-in and the start of the competition (2 hours), subjects were allowed to consume fluids and solids following the usual practice of weightlifters. The liquids/solids that

were consumed were self-reported in a food diary and quantified using the procedure detailed on the “Dietary intake” section. The ambient temperature during both simulated competitions was 20°C.

Explosive strength of the lower limb was determined using the CMJ test. Flight time and jump height were measured using Optojump® device (Microgate, Bolzano, Italy) (Castagna et al., 2013; Glatthorn et al., 2011). The participants performed jumps from an upright standing position by performing a countermovement to reach a knee angle of about 90°. Three trials were realized with the hands positioned on the waist and with a 20 s pause between successive trials. The highest of the 3 jumps was selected for analysis (Kamandulis et al., 2012). This test was done before each simulated event test after 24 hours of recovery. 20 min separated the CMJ test from the competition.

Dietary intake

Values for nutrient intakes were obtained from a 6-d food record kept during a period of weight maintenance and after a 6-d food restriction period. The diet for food restriction was self-selected. All participants received a detailed verbal explanation and written instructions.

2 procedures were used to evaluate dietary intakes. Firstly, athletes were asked to be as accurate as possible in recording the amount and type of food and fluid consumed. They were asked to record brand names of all commercial and ready-to-eat foods and the methods of preparation. A list of common household measures, such as cups and tablespoons, and specific information on the quantity in each measurement (grams, etc.) was given to each participant. Any questions, ambiguities, or omissions regarding the type and amount of food and beverages consumed were resolved during daily individual interviews. Secondly, photos of the meal during breakfast, lunch and dinner were taken before and after the meal, by one of the researcher, to quantify the amount of food consumed. This second procedure allowed the

amounts of foods rated by athletes to be checked and underestimation to be avoided as much as possible. A colour photo exhibit (SU-VI-MAX) of commonly consumed foods and their portion sizes was used to estimate amounts consumed (Su-Vi-Max, 1994). Daily energy and nutrient intakes were calculated by a computer program developed by SCDA Nutrilog version 2.31 (software package, France). This diet analysis program accesses French nutrient data base for standard reference (Martin, 2001).

Psychological measurements

Mood was measured using the Profile of Mood States (POMS) questionnaire. The POMS is a self-report questionnaire consisting of 65 adjectives designed to assess six mood states (Morgan, Costill, Flynn, Raglin, & O'Connor, 1988). The version used was a French version validated by previously (Fillion & Gagnon, 1999). The POMS inventory was used because it has been found to be a valid assessment tool for measuring alteration of mood states among weight class sport athletes (Hall & Lane, 2001), as well as for determining acute psychological responses following a single exercise or competition. French validation studies have reported internal consistency (alpha) coefficients for the Profile of Mood States subscales ranging from 0.82 to 0.92 (Cayrou et al., 2000). Subjects completing the POMS are asked to reflect on the states of their emotion over the past week including today. Scores are then obtained for subjects on the states of tension, depression, anger, vigour, fatigue and confusion. Morgan et al. (1987) noted a tendency for those regularly involved in sport and exercise to report scores for Vigour above the 50th percentile of the published norms and to report scores for Tension, Depression, Anger, Fatigue, and Confusion below the 50th percentile. The standard “how are you feeling this week, including today” instructional set was used. The POMS was administered the morning of the simulated competition after the weigh-in at T₁ and T₂.

The Recovery-Stress Questionnaire for Athletes (RESTQ-52) (Kellmann & Kallus, 2001) was used at T₁ and T₂ to assess the current stress of athletes taking recovery-associated activities into consideration. The questionnaire is constructed in a modular way including 12 scales of the general Recovery-Stress Questionnaire and an additional seven sport-specific scales. The RESTQ-Sport has 52 items (19 scales with four items each plus one warm-up item), that subjects answer retrospectively; the 24 hour test-retest reliability (*r*) is typically above 0.79 (Kellmann & Kallus, 2001). Therefore, it can be assumed that inter-individual differences in the recovery-stress state can be well reproduced and that the results of the RESTQ-Sport are stable regarding short-term functionary fluctuations and short-term changes of state. The French version of the RESTQ-Sport also has an adequate 24-hr test-retest reliability (*r* > .74) (Martinent, Decret, Isoard-Gautheur, Filaire, & Ferrand, 2014). The RESTQ-Sport in French has levels of Cronbach's alpha ranging between 0.71 and 0.87. The first seven scales cover different aspects of subjective strain (General stress, Emotional stress, Social stress, Conflicts/Pressure, Fatigue, Lack of energy, Somatic complaints) as well as the resulting consequences. Social relaxation, Somatic relaxation, General well-being, and Sleep quality are the scales used to assess recovery. Success is the only resulting recovery-oriented scale concerned with performance in general but not in a sport-specific context. Sport-specific details of stress (Disturbed breaks, Emotional exhaustion and Fitness/injury) and recovery (Being in shape, Burnout/personal accomplishment, Self-efficacy and Self-regulation) are examined in scales 13-19. A Likert-type scale is used with values ranging from 0 (never) to 6 (always) indicating how often the respondent participated in various activities during the preceding three days and nights. The mean of each scale can range from 0 to 6, with high scores on the stress-associated activity scales reflecting intense subjective strain and high scores on the recovery-oriented scales reflecting at least adequate recovery activities. The scores of s recovery-oriented scales (scale 8 to 12, 16, 17, 18, and 19) were summed up and

divided by the number of scales representing the ‘global Recovery score’. The recovery score was converted to standardized values (z-values) by subtracting the global sample mean and dividing the difference by the standard deviation. The test was administered following the same conditions at T₁ and T₂.

Hydration

Urine specific gravity (USG) was measured by refractometry on the competition day's first morning urine sample using a handheld clinical refractometer (Mission Urinalysis Reagent Strips, ACON Laboratories, Inc., San Diego, USA). Hypo-hydration was defined as USG $\geq$ 1.020 and serious hypo-hydration as USG $>$ 1.030. This test was done at T₁, and T₂.

Statistical analyses

All analyses were performed using the software program The SPSS/PC statistical package version 20 for Windows (SPSS Inc, IBM, Chicago, IL). Prior to analysis, the normality of the data distribution of each variable was established using the Kolmogorov-Smirnov test. Non-parametric tests were used due to the absence of a Gaussian distribution. We used the non-parametric Mann–Whitney U test to compare data obtained in Groups 1 and 2. The Wilcoxon signed rank-test was used to compare repeated measures in a single group. To determine the threshold for an effect, the Cohen’s effect size was calculated. Standardized thresholds of <0.2 , <0.6 , <1.2 , and <2.0 were interpreted as trivial, small, moderate, and large effects, respectively (Hopkins, 2006). Spearman rank correlation was used to analyse bivariate correlation between micronutrients and some psychological variables. The alpha value set previously at 5% was used.

RESULTS

Values for the anthropometric parameters are shown in Table 1. During the weight maintenance period (T_1), all the anthropometric parameters were not significantly different between the two groups, except for the percentage of body fat, Group 1 having significant lower values ($p < 0.05$).

At this time energy intake ($\text{MJ}\cdot\text{d}^{-1}$) corresponded to the French recommendations for both groups [56] and was similar to nutritional references reported for weightlifter populations [52]. Lipid intakes ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$) were higher than the recommendations for both groups, while protein and carbohydrate intakes were in the normal range (Table 3). Vitamin B₉, copper and magnesium were below recommended values for both groups.

Effects of dietary restriction

Both groups maintained the same training schedule throughout the experimental period.

There were no differences in body composition for Group 1 (Control) between T_1 and T_2 . Athletes in Group 2 used a combination of energy restriction and hypo-hydration-inducing methods such as reducing fluid intake.

Group 2 lost a significant amount of weight from baseline to post-weight loss (T_2) that was equivalent to 4.34% of their total body weight ($p < 0.01$). Percentage of body fat mass and fat free mass also declined significantly ($p < 0.05$) (Table 1).

From diet record analysis, the mean energy intake during weight loss period (T_2) for Group 2 was $8.4 \pm 1.4\text{MJ}\cdot\text{d}^{-1}$ (-41% compared to T_1 ; $p < 0.05$) (Table 3). The effect sizes are reported in Table 3.

Reduced energy intakes were achieved through a reduction of daily meal frequency (-8.62%) associated with a lower energy intake per meal (-40%) ($p < 0.05$). Intakes of proteins, fat and carbohydrate decreased significantly ($p < 0.05$) during this weight loss period.

The volume of fluid intake also significantly decreased for Group 2 ($p < 0.05$). The intakes of vitamins B₁, B₂, B₆, magnesium, calcium, iron and sodium were significantly lower compared to the weight maintenance period (T₁).

There were no differences in nutritional analyses for Group 1 (Control) between T₁ and T₂.

Indices of hydration status

At T₁, both groups had USG values between 1.022 and 1.023 g.ml⁻¹, with no statistical differences between groups. In the diet group (Group 2), USG was significantly higher at T₂ compared to values obtained at T₁ (1.023 ± 0.0026 g.ml⁻¹ and 1.03 ± 0.00 g.ml⁻¹, respectively; $p < 0.01$).

Physical Performance

Table 2 presents the performances obtained during both simulated competitions.

During the weight maintenance period (T₁), performances were not significantly different between the 2 groups. At T₂, despite higher performances observed in Group 1 compared with those observed in Group 2, these differences were not significant. There were no differences in performances for Group 1 between T₁ and T₂.

Table 2 : Weightlifting performance during the simulated competition at T₁ (Weight maintenance period) and T₂ (after a 6-d food restriction for Group 2). Data are expressed as mean ± SD.

	Group 1		Group 2	
	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂
Snatch (kg)	94.6 ± 25.9	97.4 ± 27.9	89.6 ± 25.4	91.8 ± 26.3
Sinclair Coefficient	1.3 ± 0.08	1.3 ± 0.07	1.21 ± 0.09	1.23 ± 0.1
Snatch (Sinclair)	121.3 ± 27.9	124.3 ± 30.4	107.4 ± 27.7	112.2 ± 28.5
Clean and Jerk (kg)	118.2 ± 34.7	123.4 ± 37.1	108.8 ± 27.9	109.5 ± 30.9
Clean and jerk (Sinclair)	151.5 ± 38.1	157.4 ± 40.7	130.4 ± 30.2	133.8 ± 33.5
Total (kg)	212.8 ± 60.5	220.8 ± 65.0	198.5 ± 53.0	201.3 ± 57.2
Total (Sinclair)	272.8 ± 65.9	281.8 ± 71.0	237.8 ± 57.5	246.1 ± 61.8*(T)
Countermovement jump(cm)	40.7 ± 4.6	42.3 ± 7.0	37.8 ± 6.1	36.6 ± 6.4

*: p < 0.05; (T₂ versus T₁), with (T) indicating a trivial effect size

In Group 2, weight reduction induced no statistical difference in CMJ performance at T₂ compared to those observed at T₁. Moreover, no statistical differences were observed for the performance in snatch and clean and jerk between T₁ and T₂. However, when we quantify the weightlifting performance using the Sinclair coefficient, which allows the results to be evaluated according to the body mass of the athlete, we noted that the absolute total performance increased significantly (p < 0.05) after a 6-day dietary restriction for Group 2.

Table 3 : Mean daily intakes of energy, macronutrients, micronutrients and water at T₁ (weight maintenance period) and T₂ (after a 6-d food restriction for Group 2). Data are expressed as mean $\pm$ SD. For comparison, French recommendations for athletes (FRA) are added [56]. Group 1: control; Group 2: diet group.

	Group 1		Group 2		FRA
	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	
Energy intake (MJ.d⁻¹)	14.4 $\pm$ 4.0	15.4 $\pm$ 5.0	14.4 $\pm$ 6.1	8.4 $\pm$ 3.6*(M)	14.7
Carbohydrates (g.kg⁻¹)	6.6 $\pm$ 1.2	6.2 $\pm$ 1.5	5.3 $\pm$ 1.4	2.8 $\pm$ 0.9*(L)	6-10
Protein (g.kg⁻¹)	1.6 $\pm$ 0.2	2.1 $\pm$ 0.3	1.4 $\pm$ 0.4	1.1 $\pm$ 0.3*(M)	1.5-3
Lipid (g.kg⁻¹)	1.8 $\pm$ 0.4	2.1 $\pm$ 0.4	1.8 $\pm$ 0.6	1.1 $\pm$ 0.4*(L)	1
Water (ml)	3652.4 $\pm$ 1122.8	3698.8 $\pm$ 1477.8	3716.5 $\pm$ 1553.9	2593.2 $\pm$ 993.8*(M)	
Vitamin B₁(mg)	1.9 $\pm$ 0.6	1.9 $\pm$ 0.6	1.7 $\pm$ 0.6	1.1 $\pm$ 0.4*(M)	1.3
Vitamin B₂ (mg)	2.8 $\pm$ 0.7	2.6 $\pm$ 1.0	2.8 $\pm$ 2.1	1.4 $\pm$ 0.9*(M)	1.6
vitamin B₉(μg)	227.0 $\pm$ 67.9	200.6 $\pm$ 76.1	225.7 $\pm$ 54.2	196.0 $\pm$ 71.9	330
Vitamin B₃ (mg)	17.4 $\pm$ 5.8	20.2 $\pm$ 10.0	22.7 $\pm$ 6.1	10.9 $\pm$ 3.1	14
Vitamin B₆ (mg)	2.3 $\pm$ 0.9	2.1 $\pm$ 0.8	2.5 $\pm$ 2.1	1.1 $\pm$ 0.5*(M)	1.8
Magnesium (mg)	242.1 $\pm$ 49.9	269.3 $\pm$ 63.8	250.4 $\pm$ 86.2	171.1 $\pm$ 64.3*(M)	410
Calcium (mg)	1173.1 $\pm$ 196.4	1273.7 $\pm$ 428.1	1053.4 $\pm$ 548.6	690.4 $\pm$ 480.6*(M)	1200
Sodium (g)	5.1 $\pm$ 1.0	5.2 $\pm$ 1.1	5.5 $\pm$ 1.8	3.9 $\pm$ 0.9*(M)	1-2
Iron (mg)	13.2 $\pm$ 4.2	16.6 $\pm$ 7.9	14.2 $\pm$ 4.5	8.8 $\pm$ 3.1*(M)	9
Copper (mg)	0.9 $\pm$ 0.1	1.0 $\pm$ 0.4	0.8 $\pm$ 0.2	0.7 $\pm$ 0.3	1.5

*: p < 0.05; (T₂ versus T₁) with (M) indicating a moderate effect size and (L) a large effect size (T₂ versus T₁)

Psychological variables

Profile of Mood States (POMS)

During the weight maintenance period (T₁), responses obtained for the POMS were not significantly different between the 2 groups. The “iceberg profile” (high score on Vigour, low scores on Depression, Tension, Fatigue, Confusion and Anger) was noted in both groups.

At T₂, we reported non-significant changes in specific mood states in the diet Group. Tension, depression, anger, fatigue scores increased. At the same time the Total Mood Disturbance (TMD) also tended to increase (+13%) (Table 4).

Fatigue was significantly higher ($p < 0.05$) in Group 2 (Diet Group) compared to score reported in Group 1 (Control).

No significant changes were noted in overall mood for Group 1 (Control) between T₁ and T₂.

Recovery-Stress Questionnaire (REST-Q)

During the weight maintenance period (T₁), responses obtained to the REST-Q were not significantly different between the 2 groups.

No significant changes were noted in overall scores for Group 1 (control) between T₁ and T₂.

Between T₁ and T₂ we noted in the diet group (Group 2) a significant increase in conflicts/pressure score ($p < 0.05$, + 144%), emotional stress score ($p < 0.05$, + 138%), and physical complaints score ($p < 0.05$, + 186%). At the same time, a significant decrease in general well-being score ($p < 0.05$, - 40%) was reported (Table 4). We also noted a significant decline in the global recovery score ($p < 0.05$, - 42%) compared with those obtained at T₁ (Table 4).

At T₂, general well-being score and emotional stress score were higher ($p < 0.05$) in Group 2 than in Group 1.

Correlations between micronutrient intakes and psychological parameters

No correlation between micronutrient intakes and any psychological parameters was noted.

Table 4 : Psychological profiles (POMS and REST-Q) (mean $\pm$ SD) during the investigation. (T₁: weight maintenance period; T₂: after a 6-d food restriction).

	Group 1		Group 2	
	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂
Tension	34.6 $\pm$ 2.8	36.6 $\pm$ 6.2	36.1 $\pm$ 3.7	40.0 $\pm$ 5.2
Depression	36.6 $\pm$ 3.7	37.8 $\pm$ 4.3	36.1 $\pm$ 2.1	39.6 $\pm$ 5.6
Anger	43.6 $\pm$ 4.62	49.8 $\pm$ 12.5	43.8 $\pm$ 4.7	48.5 $\pm$ 8.7
Vigor	55.4 $\pm$ 14.4	53.8 $\pm$ 15.0	57.0 $\pm$ 9.2	55.8 $\pm$ 11.9
Fatigue	45.0 $\pm$ 10.79	43.0 $\pm$ 5.6	48.6 $\pm$ 10.3	52.6 $\pm$ 13.5§ (M)
Confusion	39.2 $\pm$ 2.7	37.8 $\pm$ 1.6	39.6 $\pm$ 5.1	42.8 $\pm$ 6.6
TMD	143.6 $\pm$ 30.2	151.2 $\pm$ 28.4	147.5 $\pm$ 15.6	167.8 $\pm$ 42.2
Emotional Stress	1.0 $\pm$ 0.7	2.3 $\pm$ 1.4	1.3 $\pm$ 1.2	3.1 $\pm$ 1.2*
Conflicts and Pressure	1.2 $\pm$ 0.5	2.1 $\pm$ 1.4	0.9 $\pm$ 0.8	2.2 $\pm$ 1.3*
General Well Being	3.6 $\pm$ 1.3	2.6 $\pm$ 0.6	3.8 $\pm$ 1.1	1.8 $\pm$ 0.6*
Physical complaints	1.9 $\pm$ 0.6	3.1 $\pm$ 1.3	1.2 $\pm$ 1.1	3.5 $\pm$ 0.8*
Global Recovery Score	3.2 $\pm$ 1.4	2.8 $\pm$ 0.4	3.1 $\pm$ 0.7	2.1 $\pm$ 0.8*

*: p < 0.05 (T₂ versus T₁); TMD : Total Mood Disturbance

§: p < 0.05 (group 1 vs group 2) with (M) indicating a moderate effect size

DISCUSSION

To our knowledge, this is the first study that has concomitantly assessed dietary intakes, the vitamin B status, performance, and indices of psychological alterations in elite weightlifters during rapid weight loss. The main results of this study was that rapid reduction of roughly 4.34 % of bodyweight achieved by typical weightlifters' procedures induces alterations in recovery parameters evaluated through the REST-Q, but did not impair simulated weightlifting performance. We even noted an improvement in Total performance when the Sinclair coefficient was considered (Table 3).

The methods used for reducing body weight were the weightlifters' own methods that they used for competitions throughout the year, these contributed to ensuring strong external validity in this study. Moreover, we mimicked a real weightlifting competition - allowing the effect of dietary restriction on performance and psychological parameters in a real situation to

be evaluated. Finally, food records as used in this study are considered the standard for dietary assessment and provide a quantitative account of an individual's diet during a specific period. Although the weightlifters were highly motivated underreporting errors may have occurred. Therefore, it is important to view the report data as the mean intake for these athletes. Nevertheless, two procedures were used in this study to evaluate dietary intakes, which limited the underestimation effect. Baseline mean energy intake for both groups at T₁ (Table 2) was within the average range for weightlifters (Pilis et al., 2014; Storey & Smith, 2012) and athletes practicing high-intensity weight loss sports (Artioli, Gualano, et al., 2010; Degoutte et al., 2006). The average caloric intake during the food restriction period was $8.4 \pm 1.4 \text{ MJ.d}^{-1}$ inducing a decrease in body weight of 4.34% for the weight loss group (Group2), which was in accordance with other athletes in weight loss sports (Artioli, Gualano, et al., 2010; Degoutte et al., 2006; Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001). Moreover, reduced energy intakes were achieved through a reduction of daily meal frequency (-8.6%) associated with a lower energy intake per meal (-40%) ($p < 0.05$). During the same period energy intake was maintained for the weight maintenance group, allowing them to keep a constant bodyweight during the entire experimental period. In group 2 the loss of body weight represented an average of deficit of 3.4 kg in absolute (Table 1). This deficit corresponded to 1% of fat-free mass (approximately 600g of fat free mass) and less than 6% of body fat (approximately 1kg of fat). Moreover, at the same time, according to the classification of NATA [41] which differentiates between a well-hydrated status (USG values <1.010) and minimal (USG values $1.010\text{--}1.020$), significant (USG values $1.021\text{--}1.030$), and serious (USG values >1.030) hypo-hydration, the weightlifters appeared seriously hypo-hydrated. Thus, one can put forward the hypothesis that the main part of the body weight loss observed during the dietary restriction was due to body water loss. We also reported that the proportion of carbohydrates was low compared to French Recommendations (Vidailhet, 2004), an intake $< 500\text{g.d}^{-1}$ being too small

to ensure rapid glycogen resynthesis after sessions or competition (Achten et al., 2004; Ivy, 1991). The same observation has also been noted for proteins intakes whatever the period of the investigation (Table 2). These low intakes of macronutrients have also been noted among weightlifters (Pilis et al., 2014) and boxers (Reljic et al., 2015). Recent studies have emphasized the necessity of high protein intakes (until $3 \text{ g.kg}^{-1}.\text{d}^{-1}$), during restricted energy periods to preserve fat free mass and optimize fat mass loss (Helms, Zinn, Rowlands, & Brown, 2014; Phillips, 2014). The availability of carbohydrates is important for performance of short-term, high-intensity exercise, as is the case in weightlifting (Degoutte, Jouanel, & Filaire, 2003). Moreover, it has been well shown that, unless a high-carbohydrate diet is adopted during the weight reduction period, rapid weight loss decreases performance if there is no recovery time after weigh-in in judo (Degoutte et al., 2006; Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001). Other studies did not demonstrate any impairment of anaerobic performance after a rapid 5% weight loss (Artioli, Iglesias, et al., 2010; Finn, Dolgener, & Williams, 2004; Horswill et al., 1990; Sawyer et al., 2013), these conflicting findings being due to differences in the testing protocol and nutritional recovery. For example, Rankin et al. (1996) reported that a recovery diet of 275g of carbohydrate during a 5-h recovery after weight loss among wrestlers induced better performance than performance among athletes who received 170g of carbohydrates. Athletes of the present study consumed 3000 kJ during the recovery period (2 hours) ensuring an average of 100g of carbohydrate intake, which was as high as that of Rankin's study (50g per hour).

Our data show that the weight reduction did not impair simulated weightlifting performance. We even noted an improvement in performance when the Sinclair coefficient was considered (Table 3). At the same time, a significant increase of the absolute weightlifting performance (Olympic total) had been observed for the control group (Table 3). However, when we quantify the weightlifting performance using the Sinclair coefficient, there was no further

increase in this Group. As suggested by Viitasalo et al. (1987), intramuscular concentrations of ATP and phosphocreatine, mainly used in the maximum power tests, would not be reduced in response to a weight loss process. We also can put forward the hypothesis that the nutritional strategy used by the weightlifters before the beginning of the competition was sufficient to not affect competitive weightlifting performance. As also suggested previously, weightlifters may have developed metabolic adaptations as a consequence of chronic-weight-cycling, including a faster muscle glycogen restoration (Artioli, Iglesias, et al., 2010). However, this consideration remains speculative as it was not possible to determine muscle glycogen content. Recently, Helms et al. (2015) reported no variation in force production during an isometric mid-thigh pull among weightlifters after a 2-weeks period of restricted energy intake. These authors claimed that a higher fat intake (36% of total energy intake versus 15%) could be beneficial to preserve force production during this weight loss period. These recommendations are very close to the nutritional intake reported in our study, which could explain the capacity to maintain performance in the diet group. Thus future studies are needed to propose the best nutritional strategy in order to limit the possible performance alterations after a period of weight loss.

The ability to produce appropriate emotional feeling before major competitions is recognized as one of the most important factors contributing to athletic performance. It is proposed through Morgan's Mental Health Model that positive emotional health and successful athletic performance are correlated (Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001). Our results of the mood states showed that the weightlifters in both groups were characterized by an "iceberg" profile at T₁, identified in sport research as a successful mood profile and as a good predictor of a single performance (Beedie et al., 2000; Pulkkinen, 2001). Even if increases from 8 to 10% in the different negative categories from the POMS questionnaires have been noted in the Diet Group, these variations were not significant. However, the "iceberg" profile was not

maintained (Table 4). We also noted a significant decrease in the global recovery score evaluated through the REST-Q ($p < 0.05$; - 42%) at T₂ compared with those obtained at T₁. Moreover, Fatigue score was significantly higher in the Diet Group than in Control Group. Our data are in agreement with previous studies (Degoutte et al., 2006; Hall & Lane, 2001; Marttinen et al., 2011), and show that dietary restriction induces alterations in psychological parameters. However, there is a lack of consensus emerged in the literature about this topic (Foster et al., 1992; Wilson et al., 2014), these discrepancies are linked to the dietary strategy used to make weight (Wilson et al., 2012). Recently, Helms et al. (2015) showed that a high-protein / low fat diet during short-term weight loss may be more effective at mitigating mood disturbance, fatigue, diet-dissatisfaction and stress than a moderate protein / moderate fat diet in resistance-trained males. In our study, participants followed their usual diet, which corresponded at their 59% habitual calories, without any recommendations concerning a specific macronutrients program.

As mentioned in the introduction, dietary restriction during acute weight loss may put these athletes at increased risk of some vitamin deficiencies (Reljic et al., 2015). It has been shown that micronutrients are directly or indirectly involved in a number of cognitive processes (Angelo et al., 2015). Moreover, glucose metabolism in the brain requires several vitamins, including thiamine (B₁), riboflavin (B₂), niacin (B₃), that function as enzyme cofactors in the oxidation of glucose to carbon dioxide and water. Certain minerals, such as magnesium, iron and manganese are also needed to complete the metabolism of glucose. In our study, we noted that hypo-caloric diet induces a decrease in intakes of vitamins B₁, B₂, B₉, magnesium, calcium, iron and sodium compared to the weight maintenance period (T₁), ingestion of vitamins B₁, B₃, B₆, B₉ and magnesium being lower than the recommendations (Vidailhet, 2004). However, no correlations between these nutrients and psychological parameters were reported. It should be noted that the link between dietary ingestion of vitamins and the

respective blood concentrations is still controversial, no biochemical deficiencies being detected despite insufficient intakes (Fogelholm et al., 1993; Reljic et al., 2015). The complexity of factors, such as absorption, bioavailability, transfer and storage may be some parameters which could explain these lacks of correlations.

Limitations

This study had a few limitations. The small number of subjects could explain the lack of significant performance differences noted between the groups after the weight loss period. Nevertheless, as mentioned above, subjects were randomly allocated into each group (1 and 2) in a counterbalanced design using the weightlifting performance with reference. In addition, in this study, the weight loss strategy was limited to dietary restriction, which includes only reduced energy and water intakes. We have to keep in mind that weight loss strategies employed by some high-level athletes, especially weightlifters, are often mixed-methods including dietary restriction and dehydration through reduced water intake, passive and/or active sweating. These different weight loss modalities have been linked to different outcomes, especially on performance level (Viitasalo et al., 1987).

Conclusion

Despite these limitations, our results suggest that the combination of energy restriction and training, which causes weight reduction before a weightlifting competition, adversely affect some psychological parameters, without alterations in weightlifting-related performance in experienced weight-cyclers. Metabolic adaptations as a consequence of chronic-weight-cycling, including a faster muscle glycogen restoration may be a hypothesis to explain this phenomenon. Concerning practical applications, our study showed that psychological parameters monitoring, especially with the Recovery-Stress Questionnaire for Athletes, seem

to be an efficient tool to detect psychological states alteration during a weight loss period and could be frequently used by coaches in order to check their athletes' adaptations before competitions. Protein intakes, which have a great role in thermogenesis, satiety and maintenance of lean mass, were strongly reduced during the weight loss period. According to recent reviews, great attention should be focused on maintaining protein intakes during weight loss periods, in order to optimize fat mass loss and prevent lean mass degradation (Helms et al., 2014; Phillips, 2014). Moreover, because it seems that the main part of the body weight loss observed during the dietary restriction was due to body water loss, recommendations about rehydration just after the weigh-in appear to be important. As competitive weightlifting is becoming increasingly popular around the world, further research addressing the physiological responses and adaptations of weightlifters of both sexes during weight loss period is required. It also needs to be considered whether long-term adherence to such repeated weight loss might induce some risk of eating disorders.

**IX. ARTICLE 2 : INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE
SUR LES SYSTEMES PHYSIOLOGIQUES DE REPONSE AU STRESS**

**Hyperactivity of the sympatho-adrenomedullary system without any modification
of the hypothalamic-pituitary-adrenal axis following food restriction
among high-level weightlifters**

Durguerian, A., Filaire, E., Drogou, C., Sauvet, F., Bougard, C., & Chennaoui, M.

Journal of Strength and Conditioning Research, **accepté avec modifications**

INTRODUCTION

Stress is defined as a state in which an organism's homeostasis is threatened by potentially adverse physical or psychological states. The stress response is mainly regulated by two physiological systems: the sympatho-adrenomedullary-system (SAM) and the hypothalamic-pituitary-adrenal axis (HPA) (Chrousos, 2009).

Salivary α -amylase (sAA) is the main salivary protein, produced by the parotid and submandibular glands, and acts as a digestive enzyme, breaking down starch into glucose and maltose. sAA activity is regulated through the autonomic neuronal pathways and is recognized as a reliable indicator of the SAM activity (Nater & Rohleder, 2009). The sAA awakening response (AAR) is characterized by a decreased enzymatic activity followed by an increase throughout the rest of the day (Wilcox et al., 2014). Nater et al. (2007) reported an association between chronic stress and increases in daytime sAA activity.

The activation of the HPA axis leads to the release of cortisol and dehydroepiandrosterone (DHEA). Cortisol concentrations decrease progressively throughout the day (Wilcox et al., 2014) and are characterized by a 50-75% increase in the 30-45 minutes following awakening, named as Cortisol Awakening Response (CAR) (Pruessner et al., 1997). It has been introduced as a measure of the HPA axis reactivity to the awakening stress, possibly reflecting changes in the HPA axis activity after acute or chronic stressors (Clow et al., 2010). Studies exploring CAR's function have observed higher CAR values on working days compared to free-working days (Kunz-Ebrecht et al., 2004) or before competitive sporting events (Rohleder, Beulen, Chen, Wolf, & Kirschbaum, 2007), suggesting CAR plays a role in preparing the organism to the constraints of the upcoming day (Clow et al., 2010). Chronic stress has been associated with a blunted CAR (Filaire et al., 2013; Pruessner et al., 1999),

possibly indicating an exhaustion of the HPA axis activity following prolonged challenging situations.

DHEA is the most abundant circulating steroid hormone and plays a major role in the biosynthesis of sex hormones. Salivary DHEA has shown a significant positive correlation with plasma DHEA (Gallagher, Leitch, Massey, McAllister-Williams, & Young, 2006). DHEA concentration presents a similar circadian rhythm as cortisol, with a progressive decreasing slope throughout the day, while post-awakening response is characterized by reduced DHEA concentration, as opposed to cortisol (Oskis, Clow, et al., 2012; Wilcox et al., 2014). Parallel monitoring of salivary cortisol and DHEA seems useful to better explore potential dysfunction of the HPA axis, DHEA alteration reflecting only HPA axis dysfunction, while cortisol alteration could either indicate impairment of the HPA axis drive and/or of the extra-pituitary drive (Oskis, Clow, et al., 2012).

Recently, Ali & Pruessner (2012) suggested that the HPA axis and the SAM system work in coordination to mediate the physiological response to perceived stressors. It appears that the ratio of sAA over cortisol (AOC) might be a better marker of chronic stress than sAA or cortisol alone and can be used to investigate dysregulation of both stress systems (Ali & Pruessner, 2012; Filaire et al., 2013). Disruption of this coordination, consisting in an accentuated and/or blunted response to awakening from one or both molecules, has been associated to burn-out symptoms (Pruessner et al., 1999), psychological disorders (Ali & Pruessner, 2012) but also to high psychobiological solicitations after an intense training load period (Filaire et al., 2013). In this latter case, an asymmetry between both stress systems was related to alterations of psychological indicators evaluated through the Recovery-Stress Questionnaire (RESTQ-Sport).

Studies exploring chronic malnutrition, which corresponds to an insufficient calorie intakes during an extended period of time, among women suffering from eating disorders, have reported a hyperactivity of the HPA axis, resulting in increased CAR and/or hypersecretion of salivary cortisol (Filaire et al., 2015; Monteleone et al., 2011; Oskis, Loveday, Hucklebridge, Thorn, et al., 2012) and DHEA (Oskis, Loveday, Hucklebridge, Thorn, et al., 2012). On the other hand, a hypoactivity of the SAM activity was noted, resulting in a blunted AAR (Filaire et al., 2015; Monteleone et al., 2011). The enhanced HPA axis activity could be a consequence of reduced caloric intake, stimulating energy delivering processes and food intake (Filaire et al., 2015). Regarding these results, insufficient caloric intake seems to represent a challenging situation, resulting in an altered physiological response of both stress systems (Filaire et al., 2015; Monteleone et al., 2011).

Rapid food restriction consists in decreased food intakes in order to reduce energy supply and regulate body weight in a short period of time (i.e. less than 1 week). Even if progressive weight loss has been highly recommended (Fogelholm et al., 1993; Garthe et al., 2011), rapid weight loss through food restriction is still a widespread method among athletes in combat sports and weightlifting in order to reduce body weight before competition (Pettersson et al., 2013; Storey & Smith, 2012). This dietary habit has been shown to alter maximal strength level (Degoutte et al., 2006; Jlid et al., 2013; Roemmich & Sinning, 1997b) and power-related tasks (Viitasalo et al., 1987), which could be the consequence of the reduced carbohydrates intake (Degoutte et al., 2006). However, the results about the influence of food restriction on anaerobic performance capacity are not conclusive (Fogelholm et al., 1993; Helms et al., 2015; Marttinen et al., 2011; Mettler et al., 2010). The different physical tests used and the lack of sport-specific performance evaluation could be potential factors explaining these discrepancies (Marttinen et al., 2011). Considering the psychological aspects of weight loss in athletes, it has been shown that rapid food restriction alters perceived exertion and mood by

increasing tension, anger, fatigue, and confusion and decreasing vigour (Degoutte et al., 2006; Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001; Hall & Lane, 2001; Jlid et al., 2013). This temporarily reduced mental state could be an outcome of the various physiological effects induced by weight regulation, such as dehydration and hypoglycaemia (Pettersson et al., 2012). Nevertheless, the effects of energy restriction on mood are still in debate (Pettersson et al., 2013). Studies investigating physiological adaptations following a 1-week food restriction are scarce and conflicting, some studies reporting higher cortisol levels after food restriction or dehydration (Degoutte et al., 2006; Judelson et al., 2008), while no variation was observed elsewhere (Mettler et al., 2010; Roemmich & Sinning, 1997a). These differences are potentially linked to the composition of the dietary intakes and/or the use of a refeeding period after the diet phase (Wilson et al., 2012).

To our knowledge, no study has proposed to investigate the effects of a rapid food restriction period on the physiological awakening responses of salivary biomarkers in relation to psychological parameters and performance among international level weightlifters. Therefore, the purpose of this study was to evaluate cortisol, DHEA and sAA awakening responses after a 6-d food restriction among weightlifters to investigate the regulation of the HPA/SAM axis. Mood states, perceived stress and recovery states, and performance level were also evaluated. It was hypothesized that a food restriction would induce a disruption of the HPA/SAM axis coordination, induced by an increased HPA axis activity and a blunted SAM activity, concomitantly to an alteration of the psychological parameters and reduced performance level.

METHODS

Experimental approach to the problem

The schedule of the experimentation is presented in Figure 1. Participants were randomly allocated into two different groups (Control and Diet) in a counterbalanced design, using performance level as a reference. All members of the Control group (n=5) maintained their body weight constant during all the experimentation. All members of the Diet group (n=6) were asked to lose about 5% of their body weight using their usual dietary habits (i.e. the one they performed before main competition) in 6 days. Assessments (dietary intakes, anthropometric variables, physical performance, psychological parameters and physiological awakening responses) were made at baseline (T_1), 5-days after a normal period of training while maintaining body weight (T_2) and following a 6 days food restriction period (T_3) for the Diet group only. The weight maintenance period (T_1 to T_2) was used as baseline and weightlifters performed their regular training regimens. Sessions lasted between 75 to 90 minutes and were composed of technical exercises with Olympic snatch and clean and jerk lifts, weightlifting technical assistance exercises (i.e. movements from hanging position or from blocks) and strength exercises (squats, pulls and strengthening exercises). The same training program was performed during the food restriction period.

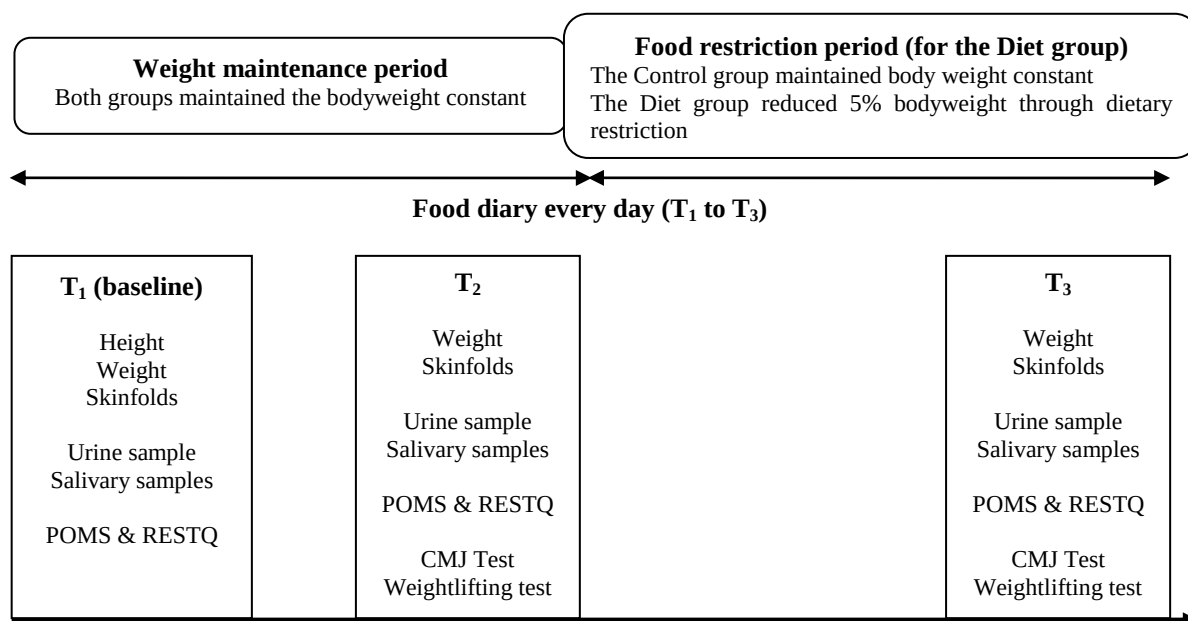


Figure 1 : Experimental design. Body weight was kept constant between T₁ and T₂. At the end of T₂, the Diet group (n=6) was asked to lose 5% of their body weight in 6 days, while participants of the Control group had to maintain their body weight constant. CMJ Test = Countermovement Jump Test; POMS = Profile of Mood States; RESTQ = Recovery-Stress Questionnaire.

Subjects

After receiving verbal and written explanation on the purpose, procedures and possible risks of the investigation, eleven international weightlifters gave their written informed consent to participate in this investigation. All participants were part of the French national junior team preparing for the European junior weightlifting championships and had competed for at least 5 years (Table 1). They were only allowed to participate in the study if they had previously practiced rapid weight reduction of their own volition more than three times in a season. All participated in twelve hours of training per week. They had a medical examination, including blood samples analyses for hormonal and biochemical parameters. No participants were taking any drugs or medication or taking any supplements, and none had a history of endocrine disorders before or during the study. All the participants were non-smokers. All

procedures were approved by the local Ethics Committee and carried out in accordance with the Declaration of Helsinki.

Table 1 : Age, competitive weightlifting experience and height for the Control group and the Diet group at baseline (T₁). Data are expressed as mean $\pm$ SD.

	Control group (n=5)	Diet group (n=6)
Time points	T ₁	T ₁
Age (years)	18.8 $\pm$ 0.8	19.8 $\pm$ 0.7
Weightlifting experience (years)	5.6 $\pm$ 2.5	6.1 $\pm$ 2.3
Height (cm)	167.8 $\pm$ 9.2	169.0 $\pm$ 9.0

Procedures

The weight and height of each participant were measured and the percentage of body fat mass was estimated from four measurements of skinfold thickness according to Durnin & Rahaman (1967). At T₁, T₂ and T₃, body mass was recorded to the nearest 0.1 kg using a portable digital scale (Precia Molen, I 200B, Precia SA, Privas, France), each athlete wearing light clothing and no footwear. Height was measured to the nearest 0.1 cm with an anthropometric plane only at T₁. A Harpenden caliper (Harpenden Skinfold Caliper) was used to measure the skinfold thickness, i.e. biceps, triceps, subscapular and suprailiac. Measurements were taken according to the protocol of the International Society for the Advancement of Kinanthropometry (ISAK). To avoid inter-observer disagreement, the same experienced exercise scientist collected all values at T₁, T₂ and T₃. Measurements were taken on the right side of the body with the athlete standing up and relaxed. Each skinfold was estimated to 0.1mm. The time of day was recorded to account for diurnal variations. Measurements were taken 2 seconds after full pressure was applied. Three measurements were taken at each site and averaged.

Dietary intakes

Values for nutrient intakes were obtained from a 6-d food record kept during a period of weight maintenance and after a 6-d food restriction period. The diet for food restriction was self-selected and corresponded to the dietary habits employed before competitions. All participants received a detailed verbal explanation and written instructions.

Two procedures were used to evaluate dietary intakes. Firstly, athletes were asked to be as accurate as possible in recording the amount and type of food and fluid consumed. They were asked to record brand names of all commercial and ready-to-eat foods and the methods of preparation. A list of common household measures, such as cups and tablespoons, and specific information on the quantity in each measurement (grams, etc.) was given to each participant. Any questions, ambiguities, or omissions regarding the type and amount of food and beverages consumed were resolved during daily individual interviews. Secondly, photos of the meal during breakfast, lunch and dinner were taken before and after the meal, by one of the researcher, to quantify the amount of food consumed. This second procedure allowed the amounts of food rated by the athletes to be checked and underestimation to be avoided as much as possible. A colour photo exhibit (SU-VI-MAX) of commonly consumed food and their portion sizes was used to estimate amounts consumed. Daily energy and nutrient intakes were calculated by a computer program developed by SCDA Nutrilog version 2.31 (software package, France).

Physical performance measures

A maximal weightlifting test and a Countermovement Jump test (CMJ test) were chosen to evaluate the effect of food restriction on physical performance. At the end of the constant body weight period (T_2) and following the food restriction period (T_3), lifters realized a

maximal performance test on the snatch and clean and jerk movements to evaluate their specific performance level. Lifters started their warm-up routine 30 minutes before the beginning of the test. Warm-up consisted in 10 minutes of general muscular activation and stretching exercises followed by 20 minutes of specific warm-up for the lift concerned. Lifters progressively raised the load from 30 to 90% of their maximum to get ready for the first attempt programmed at 95% of lifter's maximum. Each phase was supervised by certified coaches, members of the technical staff of the French national junior weightlifting team. Each test reproduced the conditions of a regular weightlifting competitive event. The best performance on each movement was retained after 3 regular attempts and summed up to obtain the Olympic total, which represents the benchmark performance in weightlifting competitions. Weightlifting performance was also quantified using the Sinclair coefficient, which is based on athlete's body weight (<http://www.iwf.net/weightlifting/sinclair-coefficient/>) allowing for intra-individual comparisons.

The CMJ test was realized at T_2 and T_3 , 20 minutes before the maximal weightlifting test. Flight time and jump height were measured using Optojump® device (Microgate, Bolzano, Italy) (Glathorn et al., 2011). The participants performed jumps from an upright standing position by performing a countermovement to reach a knee angle of about 90°. Three trials were realized with the hands positioned on the waist and with a 20-seconds pause between successive trials. The highest of the 3 jumps was selected for analysis (Kamandulis et al., 2012). The ambient temperature during both tests was 20°C.

Psychological measures

The French version of the Profile of Mood States (POMS) questionnaire, a self-report questionnaire consisting of 65 adjectives, was used to assess six mood states (tension, depression, anger, vigour, fatigue and confusion) (Morgan et al., 1988). The POMS inventory

is recognised as a valid assessment tool for measuring alteration of mood states among weight class sport athletes (Hall & Lane, 2001). French validation studies have reported internal consistency (alpha) coefficients for the POMS subscales ranging from 0.82 to 0.92 (Cayrou et al., 2000). Participants were asked to reflect on their emotional states over the past 3 days including the present day. The Total Mood Disturbance score was calculated by adding the score of each negative item (tension, depression, anger, fatigue and confusion) and subtracting the “vigour” score. The POMS was administered in the morning (11:00 AM) at T₁, T₂ and T₃.

The Recovery-Stress Questionnaire for Athletes (RESTQ-Sport) (Kellmann & Kallus, 2001) was used to assess the current stress of athletes taking recovery-associated activities into consideration. This version of the questionnaire includes 52 items divided into 19 scales. The first seven scales cover different aspects of subjective strain (General stress, Emotional stress, Social stress, Conflicts/Pressure, Fatigue, Lack of energy, Somatic complaints) as well as the resulting consequences. Social relaxation, Somatic relaxation, General well-being, and Sleep quality are the scales used to assess recovery. Success is the only resulting recovery-oriented scale concerned with performance in general but not in a sport-specific context. Sport-specific details of stress (Disturbed breaks, Emotional exhaustion and Fitness/injury) and recovery (Being in shape, Burnout/personal accomplishment, Self-efficacy and Self-regulation) are examined in scales 13-19. A Likert-type scale is used with values ranging from 0 (never) to 6 (always) indicating how often the respondent participated in various activities during the past 3 days and nights. The scores of recovery-oriented scales (scale 8 to 12, 16, 17, 18, and 19) were summed up and divided by the number of scales representing the “global recovery score”. The recovery score was converted to standardized values (z-values) by subtracting the global sample mean and dividing the difference by the standard deviation. The test was administered after the POMS questionnaire (11:05 AM) at T₁, T₂ and T₃.

Hydration status

Urine specific gravity (USG) was measured by refractometry on the first morning urine sample at T₁, T₂ and T₃ using a handheld clinical refractometer (Mission Urinalysis Reagent Strips, ACON Laboratories, Inc., San Diego, USA). Hypo-hydration was defined as USG $\geq$ 1.02 and serious hypo-hydration as USG $\geq$ 1.03 (Pettersson & Berg, 2014).

Salivary samples

After a short introduction, participants were told about the study and the procedure of saliva collection. Saliva was collected by passive drooling for 3 minutes into a plastic Eppendorf tube. They were instructed to swallow to empty the mouth before unstimulated whole saliva sample was collected. The collection of whole saliva by passive drooling seems to be the most reliable option, as cotton or polyester-based materials tend to increase acidity and to skew the concentration of salivary components (Papacosta & Nassis, 2011).

To determine sAA activity, salivary DHEA and cortisol concentrations, participants were instructed to take three saliva samples in the morning (i) immediately after awakening, (ii) 30 minutes and (iii) 60 minutes after waking at T₁, T₂ and T₃. Saliva samples, collection time and sampling duration were supervised and monitored by one of the researcher. Saliva samples were then immediately frozen and insulated packs were used to transfer samples to the laboratory where they were stored at -20°C until assay.

Participants were awoken using their own alarm clock at 07:30 AM. They were asked to take the first saliva sample immediately after awakening and to get up thereafter. They were instructed not to eat or drink or brush their teeth 30 minutes before and between saliva sampling. These instructions were repeated before and during each saliva sampling day, with both of the researchers (AD and CB) supervising and controlling the experimental process to

ensure maximal compliance with the protocol. No other instructions were given that could interfere with the participants' normal daily routines.

Salivary cortisol and DHEA were assayed using a commercially available ELISA kits (Salimetrics, Inc., State College, PA, USA), with a lower limit of sensitivity at 0.19 nmol.l^{-1} and 17.4 pmol.l^{-1} , respectively. Samples were assayed for sAA using a commercially available kinetic reaction assay without modification to the manufacturer's protocol (IBL, International GMBH, Flughafenstr. 52A, 22335 Hamburg, Germany). Results were computed in U.ml^{-1} of sAA. All samples were tested in the same series to avoid any variations between tests. The intra-assay maximum coefficient of variation was 3.7% for α -amylase, 5.3% for DHEA and 4% for cortisol. The inter-assay maximum coefficient of variation was 6.9% for α -amylase, 7.9% for DHEA and 4% for cortisol.

Statistical analyses

All analyses were performed using the software program SPSS/PC statistical package version 20.0 for Windows. Anthropometric, performance and psychological data are presented as means and standard deviations (SD). Physiological data are presented as mean and standard error of mean (SEM). Prior to analysis, the normality of the data distribution was checked using the Kolmogorov-Smirnov test. Non-parametric tests were used due to the absence of a Gaussian distribution. For all variables, the non-parametric Mann-Whitney U test was used to compare data obtained in both groups. Analysis of variance was realized using the non-parametric Friedman test. When results were significant, a post-hoc analysis was made with the Wilcoxon signed rank test to compare repeated measures in a single group. To determine the threshold for an effect, the Cohen's effect size was calculated. Standardized thresholds of <0.2 , <0.6 , <1.2 , <2.0 , >2.0 were interpreted as trivial, small, moderate, large and very large effects (Hopkins, 2006).

The post-awakening changes of sAA activity (α -amylase awakening response, AAR), cortisol (cortisol awakening response, CAR) and DHEA (DHEA awakening response, DAR) concentrations were calculated using the delta score, based on the difference between the values obtained 30 minutes after waking and the values at waking time. The area under the total response curve with respect to the ground (AUC_g) for sAA (AUC_{gsAA}), cortisol (AUC_{gc}) and DHEA (AUC_{gDHEA}) was calculated, based on the three sampling points of the morning (awakening, 30 and 60 minutes post-awakening), using the trapezoid formula (Pruessner et al., 2003). The α -amylase over cortisol ratio, named AOCg, was calculated based upon AUCg values. This variable can be thought as the variation in sAA levels after correction for cortisol variations (Ali & Pruessner, 2012).

The relationships between psychological and physiological parameters were examined using the Spearman correlation coefficients. An alpha level of 5% was used in all the analyses.

RESULTS

Weight maintenance period (T₁ to T₂)

Anthropometric parameters

Values for the anthropometric parameters are shown in Table 2. The anthropometric parameters were not significantly different between groups, except for the percentage of body fat, which was significantly higher in the Diet group compared to the Control group ($p < 0.05$) (Table 2).

Table 2 : Anthropometric data for the Control group and the Diet group during the weight maintenance period (T₁ and T₂) and following a 6-d food restriction (T₃) for the Diet group only. BMI = Body Mass Index; FFM = Fat-Free Mass. Data are expressed as mean $\pm$ SD.

	Control group (n=5)			Diet group (n=6)		
Time points	T ₁	T ₂	T ₃	T ₁	T ₂	T ₃
Body weight (kg)	68.7 $\pm$ 12.5	69.0 $\pm$ 13.0	69.0 $\pm$ 12.8	76.3 $\pm$ 13.7	76.6 $\pm$ 14.6	73.3** $\pm$ 13.9
BMI (kg.m⁻²)	24.2 $\pm$ 1.9	24.3 $\pm$ 2.1	24.3 $\pm$ 2.1	26.5 $\pm$ 2.4	26.6 $\pm$ 2.6	25.4* $\pm$ 2.5
Body Fat (%)	15.1 $\pm$ 5.8	15.0 $\pm$ 6.4	13.6* $\pm$ 6.8	23.1§ $\pm$ 6.2	22.3 $\pm$ 6.5	20.8* $\pm$ 6.4
FFM (kg)	59.0 $\pm$ 13.9	59.3 $\pm$ 14.9	60.3 $\pm$ 15.2	59.2 $\pm$ 14.3	60.1 $\pm$ 15.5	58.5 $\pm$ 14.9

** Significantly different from T₂ ($p < 0.01$)

* Significantly different from T₂ ($p < 0.05$)

§ Significantly different from the Control group at the same time point ($p < 0.05$)

Dietary intakes

Energy intakes corresponded to the French recommendations for both groups (Vidailhet, 2004) and were similar to nutritional references reported for competitive weightlifters (Storey & Smith, 2012). Lipid intakes (g.kg⁻¹.d⁻¹) were higher than the recommendations for both groups, while protein and carbohydrate intakes were in the normal range (Table 3).

Table 3 : Mean daily dietary intakes for the Control group and the Diet group during the weight maintenance period and during a 6-d food restriction for the Diet group only. For comparison, French recommendations for athletes (FRA) are indicated (46). Data are expressed as mean $\pm$ SD.

	Control group (n=5)		Diet group (n=6)		FRA
Time points	Weight maintenance	Food restriction	Weight maintenance	Food restriction	
Energy Intake (MJ.d ⁻¹)	14.4 $\pm$ 4.0	15.4 $\pm$ 5.0	14.4 $\pm$ 6.1	8.4*§ $\pm$ 3.6	14.7
Carbohydrates (g.kg ⁻¹ .d ⁻¹)	6.6 $\pm$ 1.2	6.2 $\pm$ 1.5	5.3 $\pm$ 1.4	2.8*§ $\pm$ 0.9	6-10
Protein (g.kg ⁻¹ .d ⁻¹)	1.6 $\pm$ 0.2	2.1 $\pm$ 0.3	1.4 $\pm$ 0.4	1.1*§ $\pm$ 0.3	1.5-3
Lipid (g.kg ⁻¹ .d ⁻¹)	1.8 $\pm$ 0.4	2.1 $\pm$ 0.4	1.8 $\pm$ 0.6	1.1*§ $\pm$ 0.4	1
Water (ml.d ⁻¹)	3652.4 $\pm$ 1122.8	3698.8 $\pm$ 1477.8	3716.5 $\pm$ 1553.9	2593.2* $\pm$ 993.8	

* Significantly different from the weight maintenance period ($p < 0.05$)

§ Significantly different from the Control group at the same time point ($p < 0.05$)

Physical performance

Physical performance, measured through the maximal weightlifting test and the CMJ test, were not significantly different between groups.

Psychological parameters

Results from the POMS and the RESTQ-Sport questionnaires were not significantly different between groups. The “iceberg profile” (high score on Vigour, low scores on Depression, Tension, Fatigue, Confusion and Anger), measured through the POMS questionnaire, was noted for both groups (Table 4).

Hormonal and biochemical analyses

All parameters were in the normal range within the study for both groups. Both groups had USG values between 1.022 and 1.023, without any statistical differences between groups.

There were no significant differences between groups for the salivary parameters at baseline (T₁) and following the weight maintenance period (T₂) (Figure 3).

Effects of food restriction

Both groups maintained the same training schedule throughout the experimental period.

Anthropometric parameters

The 6-d food restriction induced a significant body weight loss in comparison with T₂, that was equivalent to 4.34% of their total body weight in the Diet group ($p < 0.01$; Cohen's $d = 0.23$) (Table 2). Percentage of body fat was also significantly reduced at T₃ in comparison with T₂ (-6.4%; $p < 0.05$; Cohen's $d = 0.22$) (Table 2). No significant modifications were observed in the Control group, except for the percentage of body fat, which significantly decreased at T₃ in comparison with T₂ (-9.1%; $p < 0.05$; Cohen's $d = 0.20$).

Dietary intakes

The mean energy intakes during the food restriction period ($8.4 \pm 3.6 \text{ MJ.d}^{-1}$) was significantly reduced compared to the weight maintenance period (-41%; $p < 0.05$; Cohen's $d = 1.19$) (Table 3). Reduced energy intakes were achieved through a reduction of daily meal frequency (-8.62%; $p < 0.05$; Cohen's $d = 2.26$) associated with a lower energy intake per meal (-40%; $p < 0.05$; Cohen's $d = 1.61$). Fluids, carbohydrate, protein and fat intakes were significantly reduced by 30.2% ($p < 0.05$; Cohen's $d = 0.86$), 47.5% ($p < 0.05$; Cohen's $d = 2.13$), 23.1% ($p < 0.05$; Cohen's $d = 0.86$) and 35.0% ($p < 0.05$; $d = 1.16$), respectively, in comparison with the weight maintenance period. No significant variations were observed for the Control group.

Physical performance

Jumping performance (CMJ test) was not significantly altered by the 6-d food restriction, whatever the group considered (Figure 2). Moreover, no statistical differences were observed for the performance in the snatch and the clean and jerk movements between groups and no significant changes were noted for the Diet group. On the other hand, the absolute clean and jerk and Olympic total performance were significantly increased at T₃ for the Control group (4.4%; $p < 0.05$ and 3.8%; $p < 0.05$; respectively) (Figure 2). However, when we quantified the weightlifting performance using the Sinclair coefficient, which allows the results to be evaluated according to the body mass of the athlete, we noted that the performance in the snatch movement and the Olympic total increased significantly following the food restriction (4.5%, $p < 0.05$, Cohen's $d = 0.17$ and 3.5%, $p < 0.05$, Cohen's $d = 0.14$, respectively) (Figure 2).

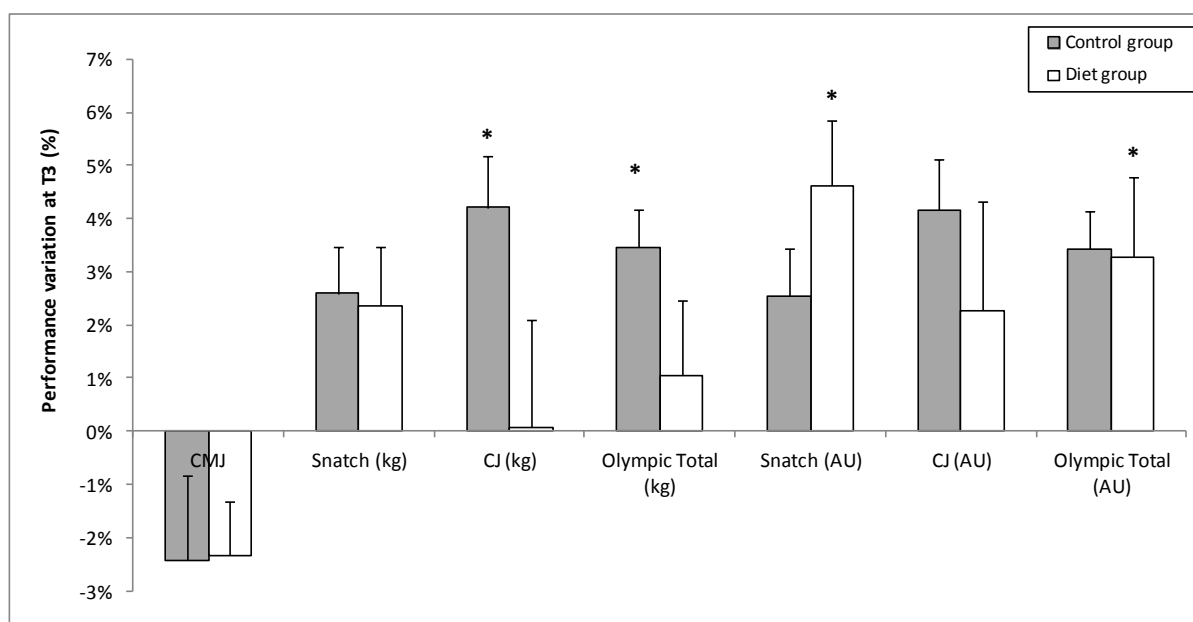


Figure 2 : Physical performance variation (in %) at T₃, following a 6-d food restriction for the Diet group only, in comparison to performance level observed after a weight maintenance period (T₂). Performance was evaluated through a Countermovement Jump test (CMJ) and a maximal weightlifting test, using the snatch and the clean and jerk (CJ) movements. Weightlifting performance was quantified as absolute performance in kilograms (kg) and using the Sinclair coefficient (Arbitrary Units, AU), based on athletes' body weight, allowing for intra-individual comparisons. Data are expressed as mean $\pm$ SD. * Significantly different from T₂ ($p < 0.05$).

Table 4 : Psychological parameters, measured through the Profil of Mood States (POMS) questionnaire and the Recovery-Stress questionnaire for athletes (RESTQ-Sport), at baseline (T₁), at the end of the weight maintenance period (T₂) and following a 6-d food restriction (T₃) for the Diet group only. Data are expressed as mean $\pm$ SD.

POMS	Control group			Diet group		
Time points	T ₁	T ₂	T ₃	T ₁	T ₂	T ₃
Tension	35.8 $\pm$ 4.1	34.6 $\pm$ 2.9	36.6 $\pm$ 6.3	35.7 $\pm$ 4.2	36.2 $\pm$ 3.8	40.0 $\pm$ 5.2
Depression	35.0 $\pm$ 2.2	36.6 $\pm$ 3.8	37.8 $\pm$ 4.4	36.3 $\pm$ 1.6	36.2 $\pm$ 2.1	39.7 $\pm$ 5.6
Anger	45.6 $\pm$ 9.7	43.6 $\pm$ 4.6	49.8 $\pm$ 12.6	45.8 $\pm$ 6.1	43.8 $\pm$ 4.7	48.5 $\pm$ 8.8
Vigour	54.6 $\pm$ 11.5	55.4 $\pm$ 14.4	53.8 $\pm$ 15.1	63.5 $\pm$ 8.1	57.0 $\pm$ 9.3	55.8 $\pm$ 11.9
Fatigue	44.0 $\pm$ 3.7	48.7 $\pm$ 10.4	52.7 $\pm$ 13.5	42.2 $\pm$ 5.8	45.0 $\pm$ 10.8	43.0 $\pm$ 5.7
Confusion	39.2 $\pm$ 4.1	39.2 $\pm$ 2.8	37.8 $\pm$ 1.6	42.2 $\pm$ 5.3	39.7 $\pm$ 5.1	42.8 $\pm$ 6.7
TMD	143.2 $\pm$ 29.2	143.6 $\pm$ 30.3	151.2 $\pm$ 28.5	140.5 $\pm$ 19.3	147.5 $\pm$ 15.7	167.8 $\pm$ 42.3
RESTQ-Sport	Control group			Diet group		
Time points	T ₁	T ₂	T ₃	T ₁	T ₂	T ₃
General stress	1.5 $\pm$ 0.7	1.5 $\pm$ 0.9	2.5 $\pm$ 1.0	1.2 $\pm$ 0.7	1.5 $\pm$ 0.6	2.4* $\pm$ 0.3
Sport-related stress	1.4 $\pm$ 1.1	1.6 $\pm$ 0.8	2.6 $\pm$ 1.2	1.7 $\pm$ 1.0	2.2 $\pm$ 0.7	2.4 $\pm$ 0.8
General recovery	3.8 $\pm$ 0.8	3.4 $\pm$ 1.4	1.4 $\pm$ 0.7	4.1 $\pm$ 1.1	3.3 $\pm$ 0.7	1.9* $\pm$ 1.2
Sport-related recovery	3.4 $\pm$ 1.2	3.1 $\pm$ 1.4	2.5 $\pm$ 1.0	3.2 $\pm$ 0.8	2.9 $\pm$ 1.0	2.5 $\pm$ 0.5
Global stress score	1.4 $\pm$ 0.7	1.5 $\pm$ 0.6	2.5 $\pm$ 1.0	1.3 $\pm$ 0.6	1.7 $\pm$ 0.4	2.4* $\pm$ 0.2
Global recovery score	3.6 $\pm$ 1.0	3.3 $\pm$ 1.4	1.9 $\pm$ 0.5	3.7 $\pm$ 0.9	3.2 $\pm$ 0.7	2.2* $\pm$ 0.8

* Significantly different from T₂ ($p < 0.05$)

Psychological variables

We reported a non-significant increase for “tension” (10.6%; Cohen’s $d = 0.84$), “depression” (9.7%; Cohen’s $d = 0.82$), “anger” (10.7%; Cohen’s $d = 0.66$) and Total Mood Disturbance (13.8%; Cohen’s $d = 0.64$) in the POMS questionnaire for the Diet group at T₃ compared to T₂ (Table 4). No significant changes were observed for the Control group.

The global stress score and general stress score for the Diet group were significantly increased at T₃, in comparison with T₂ (44.0%; $p < 0.05$; Cohen's $d = 2.64$ and 65.4%; $p < 0.05$; Cohen's $d = 2.06$; respectively), while the global recovery score and the general recovery score significantly decreased compared to T₂ (-30.5%; $p < 0.05$; Cohen's $d = 1.22$ and -44.5%; $p < 0.05$; Cohen's $d = 1.46$; respectively) (Table 4). No significant variation was observed in overall scores for the Control group.

Hormonal and biochemical analyses

The USG value for the Diet group (1.03 ± 0.00) was significantly higher compared to the Control group at T₃ (1.02 ± 0.00) ($p < 0.01$; Cohen's $d = 3.53$). We reported an enhanced AAR at T₃ ($20.1 \pm 7.7 \text{ U.ml}^{-1}$) compared to T₂ (364.6%; $p < 0.05$; Cohen's $d = 1.72$). On the other hand, the 6-d food restriction did not induce significant changes in cortisol and DHEA concentrations and awakening responses, whatever the group considered (Figure 3). Following the 6-d food restriction, the $\alpha\text{-amylase}/\text{Cortisol}$ ratio (AOCg) was not different from T₂. No significant modifications were observed for the Control group.

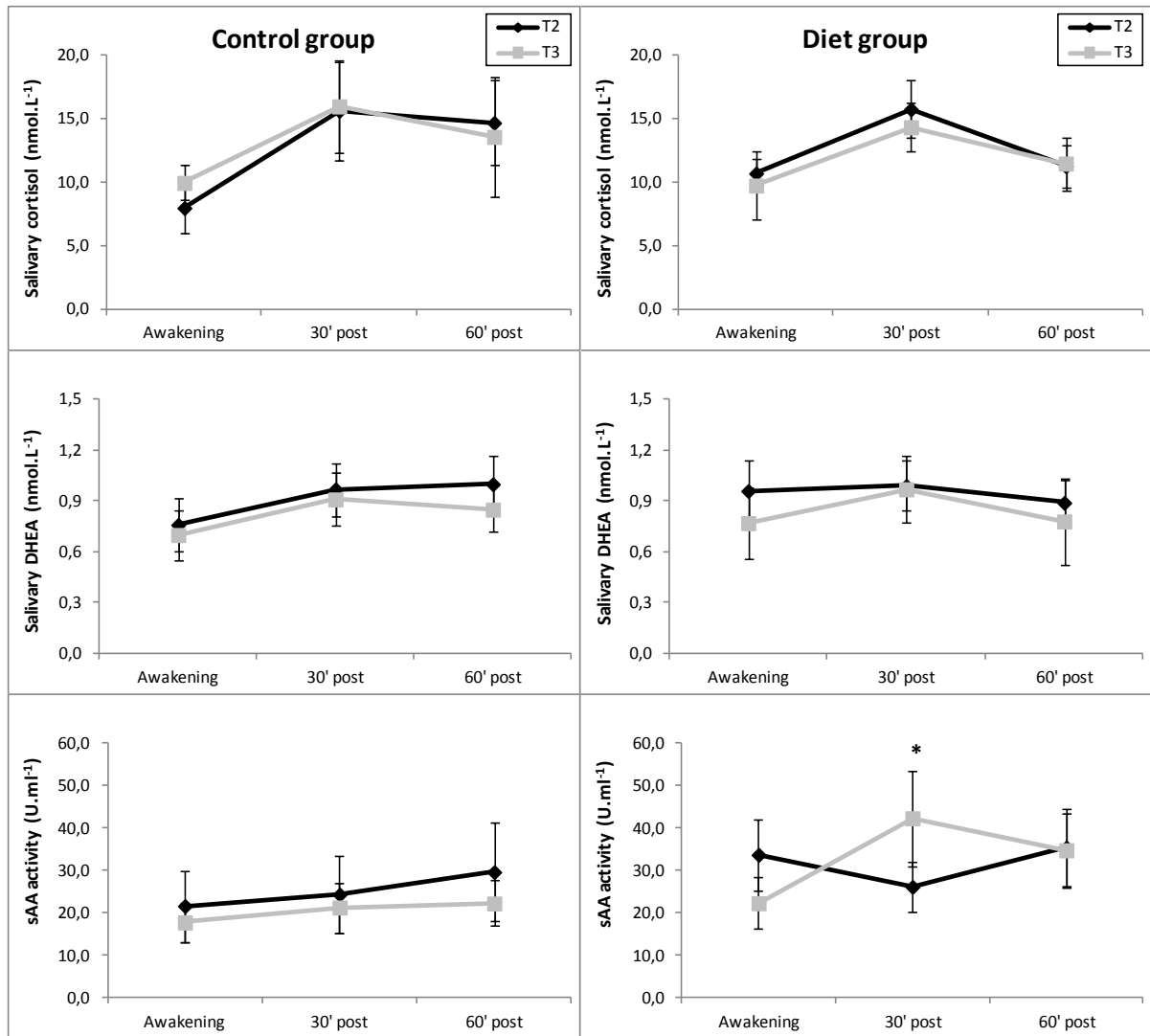


Figure 3 : Awakening patterns of salivary cortisol and DHEA concentrations and salivary alpha-amylase activity for the Control group and the Diet group during the weight maintenance period (T₂) and following a 6-d food restriction (T₃) for the Diet group only. Data are expressed as mean ± SEM. * Significantly different from T₂ ($p < 0.05$).

Correlations between psychological and physiological variables

We noted a negative correlation between AUC_{gsAA} and “vigour” in the Diet group at T₃ ($r = -0.90$; $p < 0.05$). Conversely, positive correlations were observed between AUC_{gsAA} and general recovery score ($r = 0.94$; $p < 0.01$). General recovery score was also significantly correlated with the sAA awakening response at T₃ ($r = 0.89$; $p < 0.05$).

DISCUSSION

To our knowledge, this is the first study that has concomitantly assessed dietary intakes, sport-specific performance level, indices of psychological alterations and HPA/SAM regulation following a 6-d food restriction among elite weightlifters. The main results of this study was that a 6-d food restriction, achieved by typical weightlifters' procedures, induced a significant rise of sAA activity, indicating for a hyperactivity of the SAM system, while no significant variations were observed among the HPA axis (cortisol and DHEA). We also noted significant alterations in psychological parameters after the food restriction period, without any modifications of the absolute weightlifting performance. We even noted an improvement in the snatch and the Olympic total performance when the Sinclair coefficient was considered.

The methods used for reducing body weight were the usual dietary habits practiced by the weightlifters before competition throughout the year, which contributed to ensuring strong external validity in this study. Moreover, food records as used in this study are considered the standard for dietary assessment and provide a quantitative account of an individual's diet during a specific period. Although the weightlifters were highly motivated, limited underreporting errors may have occurred. Therefore, it is important to view the reported data as the mean intake for these athletes. Baseline mean energy intake for both groups at T₁ corresponded to the nutritional recommendations for weightlifters (Storey & Smith, 2012). The average caloric intake during the 6-d food restriction was $8.4 \pm 3.6 \text{ MJ.d}^{-1}$, which represented a 41% decrease in comparison with the weight maintenance period and resulted in a 4.34% reduction of body weight in the Diet group. This dietary pattern was similar to those observed among combat sports athletes during similar weight loss period (Degoutte et al., 2006). The calorie restriction was achieved through a combination of reduced energy intake

per meal and a lower daily meal frequency. In the Diet group, the body weight loss after a 6-d food restriction represented an average deficit of 3.4 kg in absolute (Table 2). This deficit corresponded to 1% of fat-free mass (approximately 600g of fat free mass) and less than 6% of body fat (approximately 1kg of fat). At the same time, the weightlifters appeared seriously hypo-hydrated (USG values >1.030) (Pettersson & Berg, 2014). Thus, one can put forward the hypothesis that the main part of the body weight loss observed during the 6-d food restriction was due to body water loss. We also reported that the proportion of carbohydrates was low compared to French recommendations (Vidailhet, 2004) and insufficient to ensure rapid glycogen synthesis after training (Achten et al., 2004). The same observation has also been noted for protein intakes, whatever the period of this study (Table 3). These low intakes of macronutrients have also been noted among combat sport athletes (Artioli, Iglesias, et al., 2010; Roemmich & Sinning, 1997b).

Surprisingly, the HPA axis activity was not modified by the food restriction period in the Diet group. Previously, studies investigating the influence of chronic malnutrition among women suffering from eating disorders reported hyperactivity of the HPA axis (Filaire et al., 2015; Monteleone et al., 2011). Nevertheless, in healthy population, no significant alterations of cortisol concentrations were noted following diet periods (Mettler et al., 2010; Roemmich & Sinning, 1997a). HPA axis adaptation to repeated stress being a possible explanation (Schommer, Hellhammer, & Kirschbaum, 2003). In fact, it seems that acute stressors lead to an enhanced CAR, while chronic stress seems to be associated with a blunting or a lack of cortisol changes after awakening (Huber et al., 2006). Our participants were elite weightlifters accustomed to reducing calorie intake before competitive events. Therefore, we put forward the hypothesis that repeated exposure to food restriction stress induced an adaptation of the HPA axis leading to a stabilization of the cortisol and DHEA awakening response. However,

we cannot exclude that the energy-deficit induced by the food restriction period was not sufficient to stimulate HPA axis activity.

On the other hand, the food restriction period induced a significant rise of the sAA awakening response (AAR) at T₃ (Figure 3). Increased AAR has been observed among adolescent women tennis players after a 16-weeks period of intense training load and was associated to an elevated stress state (Filaire et al., 2013). Nater et al. (2007) also reported an association between chronic stress and increases in daytime sAA levels. Therefore, the increased AAR observed in our study may indicate that calorie restriction resulted in an increased activity of the SAM system to stimulate intra-cellular energy releasing processes and maintain homeostasis (Nater & Rohleder, 2009). However, increased sAA activity has been proposed to occur as a consequence of challenging situations, allowing for a higher digestive action and energy availability (Nater & Rohleder, 2009). As the food restriction period severely limited energy and glucose intake, the higher sAA activity could also be interpreted as an increased enzymatic activity to enhance glucose and energy supply. The diurnal sAA concentrations described at T₃ in our study suggest an imbalance in the stress-system, probably caused by relative increased activity of the autonomic nervous system as compared to the HPA-axis, repeated stressors leading to an asymmetry between the HPA and the SAM axis (Nater et al., 2007). Regarding the coordination between both stress systems (Ali & Pruessner, 2012), this pattern of activation could be a mechanism allowing for a mobilization of intra and extracellular fuel sources to counteract lower energy availability (SAM hyperactivity), while limiting catabolism effects on muscle tissues (maintenance of HPA axis activity) following a rapid food restriction period (Nater et al., 2007).

Counter Movement Jump performance was not altered after the 6-d food restriction (Figure 2). Similarly, weightlifting performance did not change, which is in line with previous studies

(Artioli, Iglesias, et al., 2010; Viitasalo et al., 1987). The improvement of the performance based on the Sinclair coefficient is in line with previous studies observing higher power-performance level after weight loss, probably as a consequence of an increased power-to-mass ratio (Fogelholm et al., 1993; Mettler et al., 2010; Viitasalo et al., 1987). Moreover, Viitasalo et al. (1987) suggested that intramuscular concentrations of ATP and phosphocreatine, mainly used in the maximum power tests, would not be reduced in response to a weight loss process. It is also possible that weightlifters have developed metabolic adaptations as a consequence of chronic-weight-cycling, including a faster muscle glycogen restoration (Artioli, Iglesias, et al., 2010). However, this consideration remains speculative as it was not possible to determine muscle glycogen content. Recently, Helms et al. (2015) reported no variation in force production during an isometric mid-thigh pull among weightlifters after a 2-weeks period of restricted energy intake. They claimed that a high proportion of fat intake (36% of total energy intake versus 15%) could have been beneficial to preserve force production during this weight loss period. These recommendations are very close to the nutritional intake reported in our study, which could explain the capacity to maintain performance in the diet group.

The ability to produce appropriate emotional feeling before major competitions is recognized as one of the most important factors contributing to athletic performance. It is proposed, through Morgan's Mental Health Model, that positive emotional health and successful athletic performance are correlated (Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001). The weightlifters in both groups were characterized by an "iceberg" profile at baseline, identified in sport research as a successful mood profile and as a good predictor of a single performance (Beedie et al., 2000). Even if increases from 8 to 10% in the different negative items from the POMS questionnaires have been noted in the Diet group after the 6-d food restriction (T₃), these variations were not significant. However, the RESTQ-Sport inventory reflected specific changes in the Diet group. In fact, a significant decrease in the global recovery score and a

significant increase in the global stress score were noted at T₃ in comparison with T₂ (Table 4). Our results are in agreement with previous studies and show that food restriction affects psychological parameters (Degoutte et al., 2006; Hall & Lane, 2001; Marttinen et al., 2011). However, there is a lack of consensus in the literature about this topic linked to (i) the dietary strategies (Wilson et al., 2012), (ii) the nutritional composition of the food restriction (Helms et al., 2015) and (iii) the questionnaires used (Mettler et al., 2010). Recently, Helms et al. (2015) showed that a high-protein / low fat diet during short-term weight loss may be more effective at mitigating mood disturbance, fatigue, diet-dissatisfaction and stress than a moderate protein / moderate fat diet in resistance-trained males. In our study, participants followed their usual diet, without any specific nutritional recommendations.

This study presents some limitations. The small number of participants could explain the lack of significant performance differences noted between groups following the food restriction period. Moreover, we cannot generalize our findings, even if a small sample size is strongly encouraged to maximize homogeneity of the sample. Nevertheless, participants were randomly allocated into each group in a counterbalanced design using the weightlifting performance for reference. In addition, the weight loss strategy was limited to food restriction, which only includes reduced energy and water intakes. We have to keep in mind that weight loss strategies employed by some high-level athletes, especially weightlifters, are often mixed-methods including food restriction and dehydration through reduced water intake, passive and/or active sweating. These different weight loss modalities have been linked to different outcomes, especially on performance level (Viitasalo et al., 1987).

Despite these limitations, our results suggest that the combination of energy restriction and training, which causes weight reduction, adversely affect some psychological parameters, without alterations in weightlifting-related performance in experienced weight-cyclers.

Moreover, 6-d food restriction resulted in asymmetry activation between the two stress systems, characterized by a hyperactivity of the SAM system and a stabilized HPA axis activity.

Practical Applications

These results provide encouragement to continue exploring the impact of food restriction on psychophysiological parameters in order to prevent fatigue and preserve the health of these athletes. Evaluating the awakening responses seem useful as it does not interact with the competitive event and these responses are reliable indicator of both physiological system activity. The question is now whether the dissociation of the two stress systems suggests a temporary or adaptative effect of stress on HPA and SAM axis, and the effects of this dissociation on health. Finally, coaches and athletes must take into account the importance of monitoring body weight and dietary intakes before main competitions and during the in-season to limit the amount of body weight loss. During the weight loss phase, we recommend to maintain high-carbohydrate and protein intakes ($4\text{--}7 \text{ g.kg}^{-1}.\text{d}^{-1}$ and $>2 \text{ g.kg}^{-1}.\text{d}^{-1}$, respectively) to ensure optimal glycogen synthesis and maintain fat-free mass, while reducing fat intake (20% of daily energy intake) to maximize fat-mass loss. The frequency of weight loss periods and the amount of weight loss should be limited (i.e. 2-3 times in a sport season and less than 2-3% of total body weight), especially for young athletes, to avoid the risk of harmful outcomes on health and performance.

**X. ARTICLE 3 : INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE
SUR LES REPONSES PHYSIOLOGIQUES A UNE COMPETITION
SIMULEE**

**Food restriction alters salivary cortisol and α -amylase responses to a simulated
weightlifting competition without significant performance modification**

Durguerian, A., Filaire, E., Drogou, C., Bougard, C., & Chennaoui, M.

Journal of Sports Sciences, **accepté avec modifications**

INTRODUCTION

Weightlifting is an Olympic sport that is organized according to weight classes. As is the case for all combat sports athletes, weightlifters are known to lose weight in the days immediately before the start of competition using a severe restriction of dietary and/or water intake (Dreschler, 1998). Energy restriction could be a factor that limits training adaptations and thus the capacity to recover.

Sports training and competitive situations are known to influence the activity of the hypothalamo-pituitary-adrenal (HPA) axis, inducing a release of cortisol and activating energy-delivering processes (Hellhammer et al., 2009; Viru & Viru, 2004). Under chronic stress conditions a blunted activity of the HPA axis has been observed (Pruessner et al., 1999). Stress also induces a stimulation of the sympatho-adreno-medullary system (SAM) (Ali & Pruessner, 2012). Salivary α -amylase (sAA), which is an enzyme that breaks down starch into maltose, has been recognized as a reliable indicator of SAM system activity (Nater & Rohleder, 2009). Thus, after physical exercise, sAA activity increases. Such a response has been interpreted as an increase in SAM activity to sustain higher energy requirements, as well as increased enzymatic activity to allow for a greater supply of glucose (Kivlighan & Granger, 2006; Nater & Rohleder, 2009). Recently, it was suggested that the physiological response to stress is regulated by coordination between both physiological systems, and can be measured through the Amylase Over Cortisol ratio (AOC) (Ali & Pruessner, 2012). Chronic and/or intense psychophysiological solicitations have been shown to induce a dissociation of this physiological coordination (Ali & Pruessner, 2012; Filaire et al., 2013, 2015) and have been linked to a reduced performance level (Chennaoui et al., 2016).

Chronic food restrictions, characterized by prolonged energy-deficit states, induce hyperactivity of the hypothalamo-pituitary-adrenal (HPA) axis and hypoactivity of the

sympatho-adreno-medullary system (SAM) (Filaire et al., 2015; Monteleone et al., 2011). On the other hand, studies of hormonal responses to rapid food restriction have reported increases or no variations in plasmatic cortisol levels (Degoutte et al., 2006; Mettler et al., 2010; Roemmich & Sinning, 1997a). Hormonal responses while restricting energy intake, especially those that occur during exercise, seem to be an important concern as the HPA axis and SAM system play a major role in metabolism regulation during exercise (Kivlighan & Granger, 2006; Nater & Rohleder, 2009; Viru & Viru, 2004). Similarly, the impact of rapid food restriction on anaerobic performance remains controversial (Artioli, Iglesias, et al., 2010; Degoutte et al., 2006; Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001; Fogelholm et al., 1993; Hall & Lane, 2001; Marttinen et al., 2011). These discrepancies may be due to the exercise protocols employed for performance evaluation (Marttinen et al., 2011) and/or the different modalities used for food restriction (Horswill et al., 1990).

The purpose of the present investigation was to simulate a weightlifting competition to evaluate the influence of rapid dietary restriction on physiological responses and performance among international-level weightlifters. We hypothesized that food restriction would be related to significant alterations in the response to both physiological stress systems (Filaire et al., 2015; Monteleone et al., 2011) and to reduced performance (Degoutte et al., 2006).

METHODS

Participants

After receiving verbal and written explanation of the purpose, procedures and possible risks involved, weightlifters gave their written informed consent to participate in this investigation. All participants were part of the junior French national team preparing for the European junior weightlifting championships. They were only allowed to participate in the study if they had previously practiced rapid weight reduction of their own volition more than three times in a season. All participated in 12 hours of training per week. They were given a medical examination, including blood sample analyses for hormonal and biochemical parameters. None were taking drugs or medication, or any supplements, and none had a history of endocrine disorders before or during the study. All the participants were non-smokers. All procedures were approved by the local Ethics Committee and carried out in accordance with the Declaration of Helsinki.

Experimental design

The aim of our study was to examine physiological responses and performance level during a simulated weightlifting competition after a weight-maintenance period and following a six-day dietary restriction period (Figure 1). Eleven international-level weightlifters were randomized to a Control group ($n=5$; age: 18.8 ± 0.8 years old; weightlifting experience: 5.6 ± 2.5 years; height: 167.8 ± 9.2 cm) or a Diet group ($n=6$; age: 19.8 ± 0.7 years old; weightlifting experience: 6.1 ± 2.3 years; height: 169.0 ± 9.0 cm), using performance level as a reference. After a six-day weight-maintenance period, the members of the Diet group were asked to lose about 5% of their body weight in six days using only dietary restriction, while the members of the Control group were asked to maintain their body weight constant.

Assessments (i.e. dietary intake, anthropometric variables, physical performance, and physiological parameters) were made at baseline (T_1), six days after a normal period of training while maintaining body weight (T_2) and following a six-day period of food restriction (T_3) for the Diet group only. At T_2 and T_3 a maximal weightlifting test was held, during which the physiological responses of the HPA axis and the SAM system were measured. The weight maintenance period (T_1 to T_2) was used as a baseline. Participants performed their regular training regimens and the same training program was applied during each period.

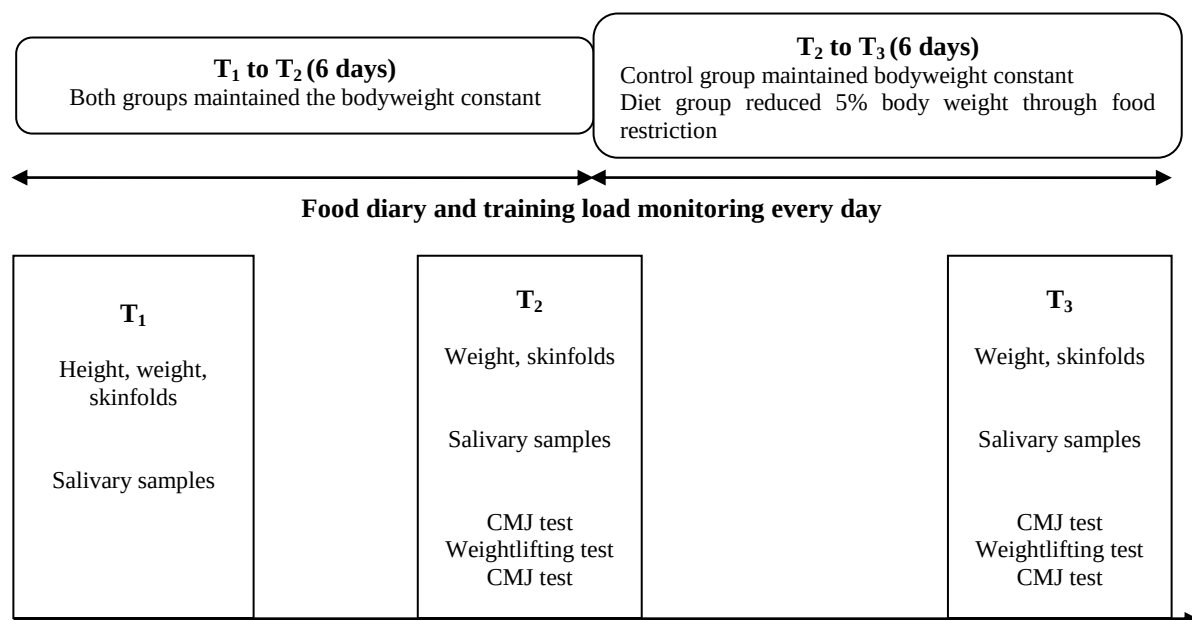


Figure 1 : Experimental timeline. Body weight was kept constant between T_1 and T_2 , and was used as a baseline phase. At the end of T_2 , the Diet group ($n=6$) was asked to lose 5% of their body weight in six days, only using dietary restriction, while members of the Control group had to maintain their body weight constant. CMJ Test = Countermovement Jump Test.

Measurements

At T_1 , T_2 and T_3 , body weight was recorded to the nearest 0.1 kg using a portable digital scale (Precia Molen, I 200B, Precia SA, Privas, France), with each athlete wearing light clothing and no footwear. Height was measured to the nearest 0.1 cm with an anthropometric plane at T_1 . A Harpenden caliper (Harpenden Skinfold Caliper) was used to measure skinfold

thickness i.e. biceps, triceps, subscapular and suprailiac at T_1 , T_2 and T_3 , and to determine the percentage of body fat (Durnin & Rahaman, 1967). The same experienced exercise scientist collected all values according to the protocol of the International Society for the Advancement of Kinanthropometry. Measurements were performed on the right side of the body with the athlete standing up and relaxed. Three measurements were taken at each site and averaged.

Dietary intake

Values for nutrient intake were obtained from a six-day food record during a period of weight maintenance (T_1 to T_2) and after a six-day period of food restriction (T_2 to T_3). The diet for food restriction was self-selected. All participants received a detailed verbal explanation and written instructions.

Two procedures were used. Firstly, athletes were asked to be as accurate as possible in recording the amount and type of food and fluid consumed. They recorded brand names of all commercial and ready-to-eat foods and the methods of preparation. A list of common household measures, such as cups and tablespoons, and specific information on the quantity in each measurement (grams, etc.) were given to each participant. Any questions, ambiguities, or omissions regarding the type and amount of food and beverages consumed were resolved during daily individual interviews. Secondly, photos of the meal were taken both before and after breakfast, lunch and dinner in order to quantify the amount of food consumed. This second procedure allowed the amounts of food rated by the athletes to be checked and to avoid underestimation. A colour photo exhibit (SU-VI-MAX) of commonly consumed food and their portion sizes was used to estimate amounts consumed. Daily energy and nutrient intakes were calculated by a computer program developed by SCDA NUTRILOG® version 2.31 (software package, France).

Physical performance

At T₂ and T₃, performance level was evaluated with a Countermovement Jump test (CMJ test) and a simulated weightlifting competition. The simulated competition sessions were held in accordance with international weightlifting rules and reproduced the conditions of an official weightlifting competition. Weigh-in was held two hours before the beginning of the competition and lasted for one hour. The warm-up and simulated competition phases were under the supervision of the national coaches of the junior French national team and corresponded to the usual routines of the participants. The best performance for each movement was retained after three regular attempts and summed to obtain the Olympic total. Weightlifting performance was also quantified using the Sinclair coefficient, based on an athlete's body weight (<http://www.iwf.net/weightlifting/sinclair-coefficient/>).

The CMJ test was undertaken 20 minutes before each of the simulated weightlifting competitions. Flight time and jump height were measured using an OPTOJUMP® device (Microgate, Bolzano, Italy) (Glatthorn et al., 2011). The participants were in an upright standing position with their hands on their waists. They performed a countermovement to reach a knee angle of about 90°. Three trials were undertaken with a 20-second pause between successive trials, with the best performance retained for analysis (Kamandulis et al., 2012). The ambient temperature during both tests was 20°C.

Salivary samples

After a short introduction, participants were told about the study and the procedure of saliva collection. Saliva was collected by passive drooling for three minutes into a plastic Eppendorf tube. They were instructed to swallow to empty the mouth before the unstimulated whole saliva sample was collected.

Participants were instructed to take one saliva sample at baseline (T_1) (1) immediately after awakening (07:30 AM). On simulated competition days (T_2 and T_3), lifters were asked to provide four saliva samples: (1) in the morning immediately after awakening (07:30 AM), (2) after the weigh-in (02:00-02:15 PM), (3) immediately after their last snatch attempt (termed post-snatch in the text) (04:45-05:00 PM), and (4) immediately after their last clean and jerk (CJ) attempt (termed post-CJ in the text) (05:45-06:00 PM). Saliva samples, collection time and sampling duration were supervised and monitored by one of the researchers. Saliva samples were immediately frozen. Insulated packs were used to transfer samples to the laboratory where they were stored at -20°C until assay.

Participants were awoken using their own alarm clock. They were asked to take the first saliva sample immediately after awakening and to get up thereafter. They were instructed not to eat, drink or brush their teeth 30 minutes before and between saliva sampling. These instructions were repeated before and during each saliva sampling day, with both of the researchers (AD and CB) supervising and controlling the experimental process to ensure maximal compliance with the protocol. No other instructions were given that could interfere with the participants' normal daily routines.

Salivary cortisol was assayed using commercially available ELISA kits (Salimetrics, Inc., State College, PA, USA), with a lower limit of sensitivity at 0.19 nmol.l^{-1} . Samples were assayed for sAA using a commercially available kinetic reaction assay without modification to the manufacturer's protocol (IBL, International GMBH, Flughafenstr. 52A, 22335 Hamburg, Germany). Results were computed in U.ml^{-1} of sAA. All samples were tested in the same series to avoid any variations between tests. The intra-assay maximum coefficient of variation was 3.7% for α -amylase and 4% for cortisol. The inter-assay maximum coefficient of variation was 6.9% for α -amylase and 4% for cortisol.

Statistical analyses

Analyses were performed using the software program SPSS/PC statistical package version 20.0 for Windows. Anthropometric, performance and psychological data are presented as mean and standard deviations (SD). Physiological data are presented as mean and standard error of mean (SEM). Prior to analysis, the normality of the data distribution was evaluated using the Kolmogorov-Smirnov test. Non-parametric tests were used due to the absence of a Gaussian distribution. For all variables, the non-parametric Mann–Whitney U test was used to compare data obtained in both groups. An analysis of variance was carried out using the non-parametric Friedman test. When results were significant, a post-hoc analysis was made with the Wilcoxon signed rank test to compare repeated measures in a single group. To determine the threshold for an effect, the Cohen's effect size was calculated and evaluated as trivial (0-0.19), small (0.20-0.49), medium (0.50-0.79) or large (0.80 and greater) (Cohen, 1992).

Variations in salivary cortisol concentrations and sAA activity following the snatch, and clean and jerk movements were calculated using the delta score between the post-weigh-in values and the post-snatch and post-CJ values, respectively. The area under the total response curve with respect to the ground (AUCg) for sAA (AUC_{gsAA}) and cortisol (AUC_{gsC}) was calculated with the trapezoid formula using the post-weigh-in, post-snatch and post-CJ values (Pruessner et al., 2003). The α -amylase over cortisol ratio, termed the AOCg, was determined based upon AUCg values (AUC_{gsAA}/AUC_{gsC}).

The relationships between psychological and physiological parameters were examined using the Spearman correlation coefficients. An alpha level of 5% was used in all the analyses.

RESULTS

Anthropometric parameters and dietary intake

The anthropometric parameters were not significantly different between groups at baseline, except for the percentage of body fat, which was significantly higher in the Diet group compared with the Control group ($P < 0.05$) (Table 1). In the Diet group, the six-day period of food restriction induced a 4.34% body weight loss ($P < 0.01$, Cohen's $d = 0.23$) and a significant reduction in the percentage of body fat (-6.4%; $P < 0.05$, Cohen's $d = 0.22$) in comparison with T_2 . Similarly, the percentage of body fat in the Control group was significantly lower at T_3 compared with T_2 (-9.1%; $P < 0.05$, Cohen's $d = 0.20$) (Table 1).

Table 1: Anthropometric data (mean $\pm$ SD) for the Control group and the Diet group during the weight maintenance period (between T_1 and T_2) and after a six-day period of food restriction (T_3) for the Diet group only.

Time points	Control group (n=5)			Diet group (n=6)		
	T_1	T_2	T_3	T_1	T_2	T_3
Body weight (kg)	68.7 $\pm$ 12.5	69.0 $\pm$ 13.0	69.0 $\pm$ 12.8	76.3 $\pm$ 13.7	76.6 $\pm$ 14.6	73.3** $\pm$ 13.9
BMI (kg.m⁻²)	24.2 $\pm$ 1.9	24.3 $\pm$ 2.1	24.3 $\pm$ 2.1	26.5 $\pm$ 2.4	26.6 $\pm$ 2.6	25.4* $\pm$ 2.5
Body Fat (%)	15.1 $\pm$ 5.8	15.0 $\pm$ 6.4	13.6* $\pm$ 6.8	23.1§ $\pm$ 6.2	22.3 $\pm$ 6.5	20.8* $\pm$ 6.4
FFM (kg)	59.0 $\pm$ 13.9	59.3 $\pm$ 14.9	60.3 $\pm$ 15.2	59.2 $\pm$ 14.3	60.1 $\pm$ 15.5	58.5 $\pm$ 14.9

* Significantly different from T_2 ($P < 0.05$). ** Significantly different from T_2 ($P < 0.01$).

§ Significantly different from the Control group at the same point in time ($P < 0.05$).

The Diet group reduced its mean daily energy intake by 41.8% during the food restriction period ($P < 0.05$, Cohen's $d = 1.19$). This was associated with a significant reduction of fluids, carbohydrate, protein and fat intake compared with the weight maintenance period (-30.2%, $P < 0.05$, Cohen's $d = 0.86$; -47.5%, $P < 0.05$, Cohen's $d = 2.13$; -23.1%, $P < 0.05$,

Cohen's $d = 0.86$; -35.0% , $P < 0.05$, Cohen's $d = 1.16$; respectively). Conversely, the mean daily energy intake for the Control group was kept constant during both periods ($14460.0 \pm 4070.0 \text{ kJ.d}^{-1}$ and $15430.0 \pm 5020.0 \text{ kJ.d}^{-1}$).

Table 2: Physical performance (mean $\pm$ SD) evaluated through a Countermovement Jump test (CMJ) before a maximal weightlifting test, during a weight-maintenance period (T_2) and after a six-day period of food restriction (T_3) for the Diet group only. Weightlifting performance was quantified using both absolute (kg) and relative performance level (AU, arbitrary units).

	Control group		Diet group	
Time points	T_2	T_3	T_2	T_3
CMJ (cm)	43.3 ± 6.3	42.3 ± 7.0	37.8 ± 6.1	36.6 ± 6.5
Snatch (kg)	94.6 ± 25.9	97.4 ± 28.0	89.7 ± 25.4	91.83 ± 26.4
CJ (kg)	118.2 ± 34.8	123.4* ± 37.1	108.83 ± 28.0	109.5 ± 31.0
Olympic Total (kg)	212.8 ± 60.6	220.8* ± 65.0	198.5 ± 53.0	201.33 ± 57.2
Snatch (AU)	121.3 ± 28.0	124.3 ± 30.4	107.4 ± 27.8	112.3* ± 28.5
CJ (AU)	151.5 ± 38.1	157.5 ± 40.8	130.4 ± 30.2	133.8 ± 33.5
Olympic Total (AU)	272.9 ± 65.9	281.8 ± 71.0	237.8 ± 57.5	246.1* ± 61.9

* Significantly different from T_2 ($P < 0.05$).

Physical performance

No statistical differences were observed between groups for the performance in the CMJ test, and in the snatch and CJ movements. Furthermore, no significant changes were noted for the Diet group after the six-day period of food restriction (Table 2). Conversely, the absolute performance level in the CJ movement and the Olympic total were significantly improved for the Control group at T_3 (4.4%, $P < 0.05$, Cohen's $d = 0.14$ and 3.8%, $P < 0.05$, Cohen's $d = 0.13$, respectively) (Table 2). When quantifying the weightlifting performance using the

Sinclair coefficient, the snatch and the Olympic total performance level were significantly increased for the Diet group at T₃ (4.5%; $P < 0.05$, Cohen's $d = 0.17$ and 3.5%, $P < 0.05$, Cohen's $d = 0.14$, respectively) (Table 2).

Hormonal and biochemical analyses

All parameters were in the normal range within the study. No significant differences were reported between groups, whatever the period considered (Figure 2). The salivary cortisol levels and sAA activity at awakening (07:30 AM) were not significantly altered during the experiment, whatever the group considered.

At T₂, the salivary cortisol concentration increased after the snatch movement in both groups (84.9% and 220.8%, respectively), only reaching a significant level for the Diet group ($P < 0.05$, Cohen's $d = 1.48$), and then significantly decreasing following the final CJ attempt (-46.3%, $P < 0.05$, Cohen's $d = 0.92$) for the Diet group only (Figure 2). The sAA activity did not show any significant variation before or in response to the simulated competition (Figure 2).

Following the food restriction period, the post-snatch salivary cortisol concentration was significantly reduced in comparison with T₂ for the Diet group (-45.5%, $P < 0.05$, Cohen's $d = 0.89$). No other significant variation was reported, whatever the group considered (Figure 2).

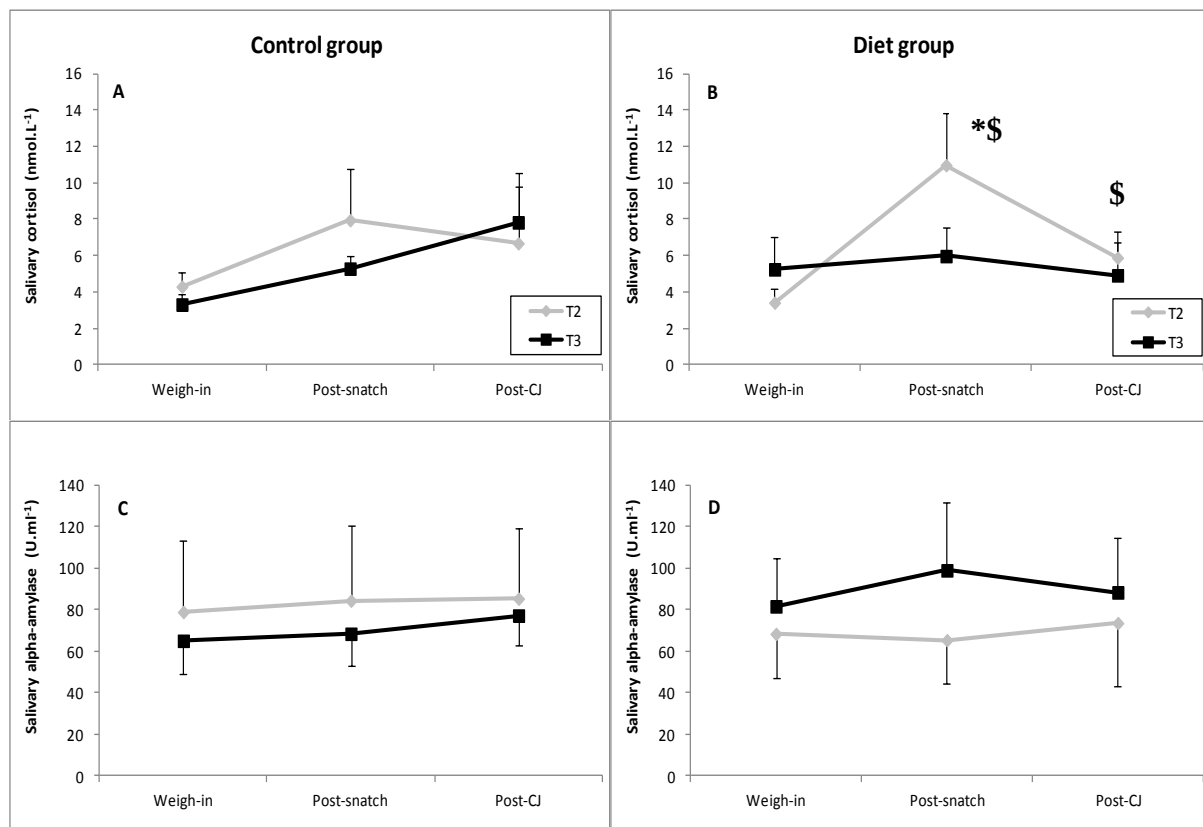


Figure 2 : Salivary cortisol concentrations and sAA activity (mean $\pm$ SEM) for the Control group (A-C) and the Diet group (B-D) at weigh-in (Weigh-in, 02:00-02:15 PM), after the third snatch attempt (Post-snatch, 04:45-05:00 PM) and after the third CJ attempt (Post-CJ, 05:45-06:00 PM) of a simulated competition held during a weight-maintenance period (T₂) and after a six-day period of food restriction (T₃) for the Diet group only.* Significant difference between both periods (T₂ vs T₃) ($P < 0.05$). \$ Significant difference from the preceding point in time ($P < 0.05$).

At T₃, the AUC_{gsC} for the Diet group was significantly reduced in comparison with T₂ (-25.8%, $P < 0.05$, Cohen's $d = 0.47$) (Figure 3). Conversely, the AUC_{gsAA} for the Diet group was significantly increased at T₃ (21848.9 ± 5909.3 AU) in comparison with T₂ (16192.0 ± 5072.0 AU) (34.9%, $P < 0.05$, Cohen's $d = 0.42$). Finally, the six-day period of food restriction brought about a significant increase in the AOCg ratio at T₃ in comparison with T₂ (68.4%, $P < 0.05$, Cohen's $d = 0.68$). No significant variation was noted for the Control group (Figure 3).

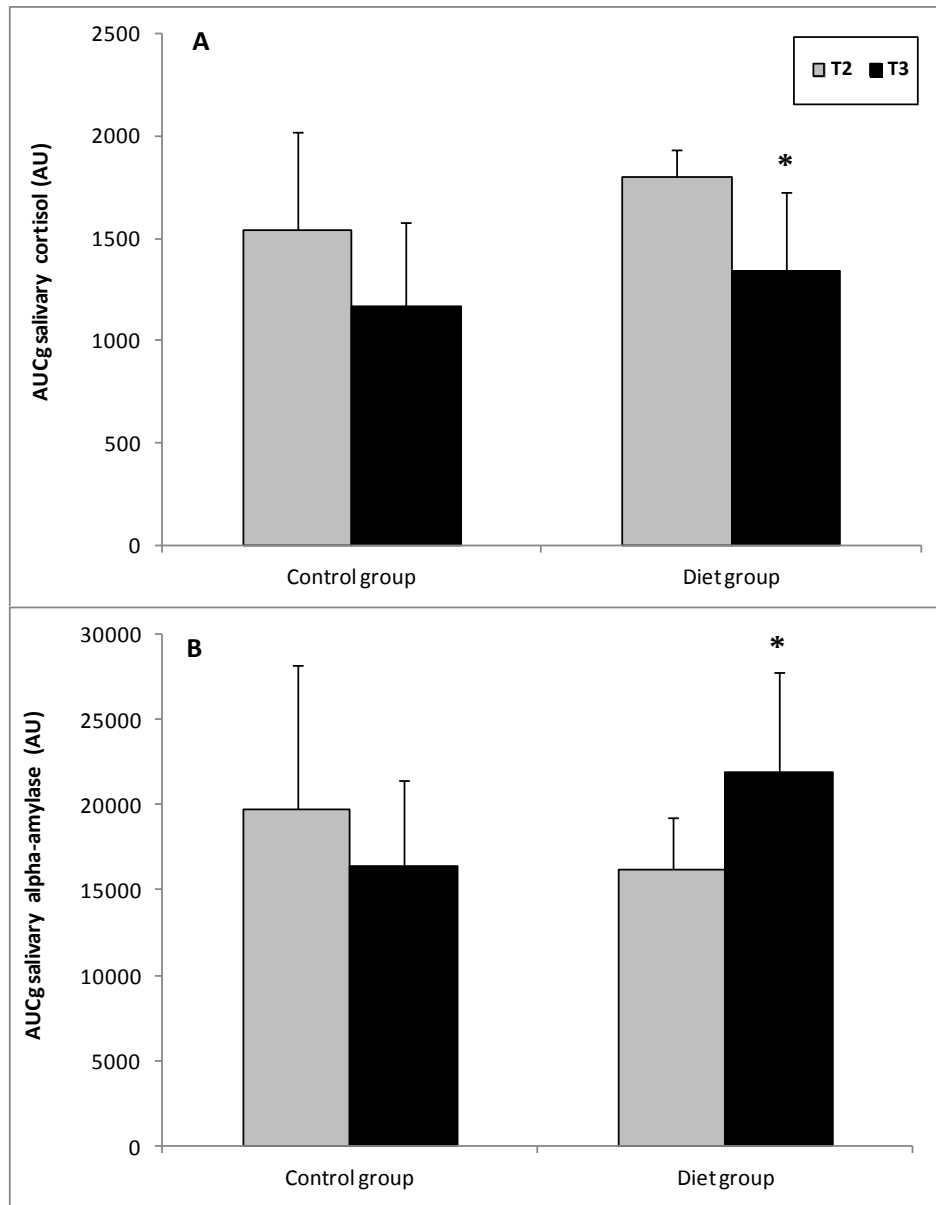


Figure 3 : AUC_{gsC} (A) and AUC_{gsAA} (B) (mean $\pm$ SEM) during a simulated weightlifting competition held during a weight maintenance period (T₂) and after a six-day period of food restriction (T₃) for the Diet group only. * Significant difference between both periods (T₂ vs T₃) ($P < 0,05$).

The post-CJ variation of salivary cortisol in the Control group was significantly increased at T₃ in comparison with T₂ (88.0%, $P < 0.05$; Cohen's $d = 0.38$), and significantly higher than the Diet group value at T₃ ($P < 0.05$) (Figure 4a). Conversely, we observed a significant reduction in variation between the post-snatch and post-CJ levels of salivary cortisol for the Diet group at T₃ in comparison with T₂ (-90.5%, $P < 0.05$; Cohen's $d = 1.40$ and -113.8%, $P <$

0.05; Cohen's $d = 0.96$; respectively) (Figure 4a). No significant variation was noted for sAA responses to both movements, whatever the group considered (Figure 4b).

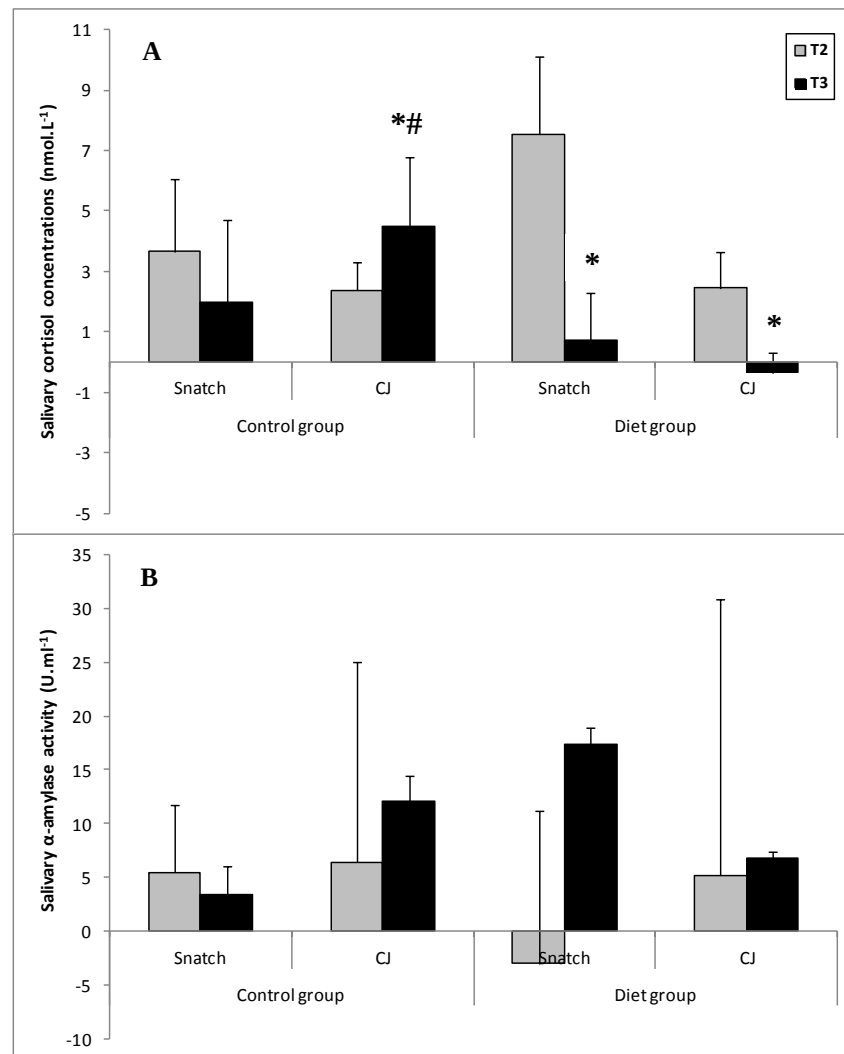


Figure 4: Post-snatch and post-CJ variation for salivary cortisol concentrations (A) and sAA activity (B) (mean $\pm$ SEM) during a simulated weightlifting competition held during a weight maintenance period (T₂) and after a six-day period of food restriction (T₃) for the Diet group only. The variation was calculated based on the difference between the weigh-in value and the post-snatch or CJ values. * Significant difference between both periods (T₂ vs T₃) ($P < 0.05$). # Significant difference between groups at the same time point ($P < 0.05$).

DISCUSSION

To our knowledge, this study is the first to investigate the influence of rapid food restriction on performance and physiological responses during a simulated weightlifting competition.

Even though the absolute weightlifting performance level was not altered after the six-day period of food restriction (Table 2), we did report a significant increase in the relative performance level (Sinclair coefficient) for the Diet group, probably as a result of an increased power-to-body mass ratio. Food restriction altered the physiological responses of both stress systems to the simulated weightlifting competition, resulting in hypoactivity of the HPA axis and hyperactivity of the SAM system (Figures 2-4). These results may indicate that a rapid reduction in dietary intake brings about a dissociation of both physiological systems in response to physical exercise, a finding that has previously been related to a stressful environment for the organism (Ali & Pruessner, 2012; Filaire et al., 2013) and lower performance levels (Chennaoui et al., 2016).

The six-day period of food restriction was brought about by a 41.8% reduction in mean daily energy intake, leading to a 4.34% decrease in body weight for the Diet group. These results are similar to those previously observed among combat sports athletes (Degoutte et al., 2006). Energy restriction has been associated with a carbohydrate intake that is low and insufficient ($2.8 \pm 0.9 \text{ g.kg}^{-1}.\text{d}^{-1}$), compared with the nutritional recommendations for athletes (Slater & Phillips, 2011) (Table 1). Protein intake was also reduced ($1.1 \pm 0.3 \text{ g.kg}^{-1}.\text{d}^{-1}$), which is consistent with previous studies (Artioli, Iglesias, et al., 2010; Roemmich & Sinning, 1997b). The capacity to maintain performance levels following dietary restriction could be explained by the maintenance of intramuscular concentrations of ATP and phosphocreatine (Viitasalo et al., 1987) and/or a high proportion of fat intake (> 30% of total energy intakes) during the food restriction period (Helms et al., 2015). The reduced percentage of body fat may have resulted in an increased power-to-body mass ratio, allowing for a higher relative performance level (Fogelholm et al., 1993; Mettler et al., 2010; Viitasalo et al., 1987). On the other hand, the improvement of the absolute weightlifting performance level for the Control group at T₃

could indicate that restricting energy intake impairs training adaptation and absolute performance development among the Diet group, as suggested previously (Paillard, 2006).

The post-snatch cortisol concentrations, the AUC_{gsC} , and post-snatch and post-CJ variations in salivary cortisol were significantly reduced at T_3 in comparison with T_2 (Figures 2-4). Conversely, the post-CJ variation in the salivary cortisol of the Control group at T_3 was significantly enhanced in comparison with T_2 (88.7%), and was also significantly higher compared with the Diet group at the same point in time (Figure 4). Previously, reduced cortisol response to exercise has been linked to a fatigued and/or an overreaching state, as a consequence of an exhaustion of the HPA axis (Viru & Viru, 2004). Taken together, these results may indicate a dysfunction of the HPA axis in response to exercise, which seems detrimental to weightlifting performance. Moreover, the increased AUC_{gsAA} value at T_3 compared with T_2 (34.9%) may suggest that rapid and severe energy restriction stimulates SAM system activity in response to exercise stress. Recently, an opposite pattern between the HPA axis and the SAM system was observed during a high-level swimming competition (Chennaoui et al., 2016). This phenomenon was described as a physiological mechanism by which increased SAM system activity could compensate for reduced HPA axis activity to maintain an adequate energy supply (Chennaoui et al., 2016). Moreover, the six-day food restriction period induced a severe energy-deficit state, leading to a disruption of both physiological stress systems in response to the simulated competition, as highlighted by the higher AOCg ratio in the Diet group (68.4%). In relation to these results, the reactivity of the SAM system would be essential in maintaining energy supplies in the case of blunted HPA axis activity. It is noteworthy that the dissociation of the coordination between both stress systems has been previously associated with a stressful environment (Ali & Pruessner, 2012; Filaire et al., 2013), as well as to reduced performance (Chennaoui et al., 2016). Therefore, it seems that a combination of energy restriction and training brought about hypoactivity of the

HPA axis concomitant to hyperactivity of the SAM system in response to exercise stress, thus confirming our hypotheses. With regard to the significant improvements in performance level reported for the Control group, we suggest that energy restriction led to limited training adaptation for the Diet group, potentially through a dysfunction of the HPA axis. Further investigations are needed to clearly determine if this altered physiological response is related to performance impairment during official competition situations, because physiological responses may differ (Filaire et al., 2009).

This study had a few limitations. The small number of participants could explain the lack of significant performance differences noted between groups following the food restriction period. Moreover, whilst a small sample size is strongly encouraged to maximize homogeneity of the sample, it does not allow us to generalize our findings. Nevertheless, participants were randomly allocated into each group using a counterbalanced design based on weightlifting performance. In addition, the weight loss strategy was limited to food and water restriction. We have to keep in mind that weight loss strategies employed by high-level athletes are often mixed methods that include dietary restriction and dehydration through reduced water intake, passive and/or active sweating (Franchini et al., 2012; Hall & Lane, 2001; Hellhammer et al., 2009; Steen & Brownell, 1990). These different weight loss modalities have been linked to different outcomes, especially in terms of performance level (Viitasalo et al., 1987). Finally, salivary cortisol and α -amylase responses to competition are part of a complex phenomenon that involves multifactorial parameters, such as basal testosterone (Zilioli & Watson, 2013), coping strategies and personality traits (Chennaoui et al., 2016; Filaire, Maso, Sagnol, et al., 2001; Zilioli & Watson, 2013), which have not been evaluated in this study.

Conclusion

Taking these results into consideration, rapid food restriction clearly threatens physiological responses to exercise, which seems harmful to absolute performance development among high-level weightlifters. In order to avoid the negative outcomes reported in our study, we highly encourage weightlifters to limit global weight reduction before main competition to 2 to 3% of their body weight (Sundgot-Borgen & Garthe, 2011). If food restriction is necessary, it should allow for adequate carbohydrate intake ($4\text{--}7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$) to ensure optimal recovery between training sessions (Horswill et al., 1990; Slater & Phillips, 2011). High protein intake (up to $3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$) and limited fat intake (25% of daily energy intake) are recommended to preserve fat-free mass and maximize fat mass loss (Phillips, 2014; Turocy et al., 2011). Such a strategy contributes to performance maintenance while losing weight. Finally, food restriction periods should be limited to avoid the metabolic adaptations induced by energy-deficit states (Trexler et al., 2014), leading to increasingly aggressive eating behaviors, potentially accentuating the negative outcomes on health and performance (Turocy et al., 2011).

XI. DISCUSSION GENERALE

XI.1. Influence sur le niveau de performance

Nous avons constaté que ni la performance sur le CMJ, ni la performance absolue, mesurée lors de la compétition simulée, n'ont été modifiées par la période de restriction alimentaire chez le groupe Restriction. Inversement, nous avons observé une augmentation du niveau de performance relative, calculé sur la base de l'indice Sinclair, sur le mouvement de l'arraché et du total Olympique après la période de restriction alimentaire chez ce même groupe. Enfin, une augmentation significative du niveau de performance absolue sur le mouvement de l'épaulé-jeté et du total Olympique a été relevée chez le groupe Contrôle.

a) Maintien de la performance absolue chez le groupe Restriction

L'absence de variation du niveau de performance à la suite de la phase de restriction alimentaire est conforme aux précédents travaux ayant étudié l'influence de la perte de poids sur les indicateurs de performance (Artioli, Iglesias, et al., 2010; Cengiz, 2015; Fogelholm et al., 1993; Hall & Lane, 2001; Helms et al., 2015; Judelson et al., 2007; Martinen et al., 2011; Mettler et al., 2010; Sawyer et al., 2013; Viitasalo et al., 1987; Walberg et al., 1988). Cependant, il existe une forte hétérogénéité dans les protocoles de recherche, liée aux indicateurs de performance utilisés (i.e. force, endurance, puissance), aux groupes musculaires sollicités et aux modalités de la perte de poids (e.g. déshydratation, restriction alimentaire, diurétiques). Lorsque nous nous intéressons spécifiquement aux études portant sur la restriction alimentaire rapide (i.e. inférieure à 2 semaines), il est possible de constater que la performance sur le CMJ n'est pas altérée (Fogelholm et al., 1993; Sawyer et al., 2013;

Viitasalo et al., 1987). Les résultats sur les capacités de force sont contradictoires, certains observant une diminution de la force maximale (Degoutte et al., 2006; Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001; Jlid et al., 2013; Mero et al., 2010; Mettler et al., 2010; Robinson et al., 2015; Roemmich & Sinning, 1997b; Viitasalo et al., 1987), alors que d'autres rapportent un maintien du niveau de performance (Helms et al., 2015; Martinen et al., 2011; Mettler et al., 2010; Sawyer et al., 2013). Une fois encore, les caractéristiques de l'évaluation, telles que les modalités de contraction (i.e. isométrique, isoinertiel ou isocinétique), les groupes musculaires sollicités ou le type d'exercice (i.e. poly-articulaires ou mono-articulaires) rendent difficile la généralisation de ces résultats. Seule l'étude de Helms et al. (2015) a utilisé des sollicitations proches des mouvements d'haltérophilie (i.e. tirage d'épaulé réalisé en isométrie). A la suite d'une restriction alimentaire de 14 jours, correspondant à une diminution de 40% des apports caloriques habituels, aucune variation significative du niveau de force maximale isométrique n'a été observée chez des sujets entraînés en musculation. Ces auteurs proposaient qu'une alimentation riche en lipides (> 30% des AET) pouvait expliquer le maintien des qualités de force lors d'une période de déficit énergétique. Ces préconisations sont similaires aux valeurs observées chez les sujets du groupe Restriction ($39.6 \pm 4.9\%$ des AET) et semblent se justifier par l'implication du métabolisme lipidique à la fourniture énergétique lors d'une séance de musculation (Essén-Gustavsson & Tesch, 1990). Néanmoins, il est nécessaire de signaler qu'Essén-Gustavsson & Tesch ont évalué la contribution du métabolisme lipidique dans le cadre d'une séance de musculation de 30 minutes, avec des sollicitations musculaires d'une durée de 30 secondes (12 répétitions) espacées d'une minute de récupération. Ces modalités de travail, bien que spécifiques à l'entraînement en musculation, sont différentes de celles d'une compétition d'haltérophilie, caractérisée par des sollicitations musculaires de courte durée, intenses et avec des temps de récupération supérieurs (Storey & Smith, 2012). D'autre part, une diminution du niveau de

force maximale a été observée, à la suite d'une restriction alimentaire de 7 jours, malgré des apports lipidiques similaires aux recommandations de Helms et al. (2015) (40% des AET) (Jlid et al., 2013).

D'autres auteurs ont suggéré que le maintien du niveau de performance pouvait être en lien avec des adaptations métaboliques. Tout d'abord, la restriction des apports caloriques ne modifierait pas les concentrations intramusculaires d'ATP et de phosphocréatine, qui sont les sources énergétiques prioritairement mobilisées lors des tests de force et de puissance (Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001; Koral & Dosseville, 2009; Viitasalo et al., 1987). Il est également possible que les sportifs habitués aux périodes de restriction alimentaire, tels que l'étaient les participants de notre étude, aient développé des adaptations métaboliques permettant une restauration plus rapide des réserves intramusculaires de glycogène (Artioli, Iglesias, et al., 2010). Enfin, les sportifs bénéficiaient d'une période de 2 heures, conformément au règlement de la fédération internationale d'haltérophilie, où ils pouvaient boire et manger à leur convenance. Les apports nutritionnels au cours de la période de recharge permettent de récupérer une partie du poids de corps perdu. Ce processus a été décrit comme un mécanisme pouvant contribuer au maintien de la performance (Artioli, Iglesias, et al., 2010; Fogelholm et al., 1993; Mendes et al., 2013). Lors de cette phase, les haltérophiles ayant maintenu leurs apports nutritionnels ont eu de faibles apports caloriques et hydriques (267.5 ± 535 kJ et 450 ± 100 ml d'eau). Inversement, les haltérophiles du groupe Restriction ont augmenté leurs apports nutritionnels (3429 ± 667 kJ et 1136 ± 342.5 ml d'eau). Dans notre étude, la durée de la période de restauration était inférieure à celle proposée dans les précédents travaux (4 et 5 heures), ce qui expliquerait les valeurs supérieures rapportées par Fogelholm et al. (1993) (8443 kJ) et Artioli, Iglesias, et al. (2010) (5814.4 kJ). Néanmoins, la capacité des sportifs à se réhydrater et à se restaurer durant cette phase semble un facteur majeur dans la capacité à maintenir leur niveau de performance (Mendes et al., 2013).

Par conséquent, l'absence de variation de la performance sur le CMJ et sur la performance absolue en haltérophilie serait conforme aux résultats de la littérature. Les processus sous-jacents à ces résultats semblent multifactoriels. La composition du régime alimentaire durant la période de restriction, les adaptations métaboliques et/ou la stratégie nutritionnelle de la période post-pesée sont autant d'éléments ayant pu contribuer au maintien de la performance. Au-delà de ces aspects, la perception positive du processus de perte de poids pourrait avoir favorisé ce phénomène (Filaire et al., 2007; Franchini et al., 2012; Hall & Lane, 2001; Pettersson et al., 2013; Steen & Brownell, 1990).

b) Amélioration de la performance relative chez le groupe Restriction

L'augmentation significative de la performance relative en haltérophilie, calculée sur la base du coefficient Sinclair, met en exergue un potentiel effet bénéfique de la restriction alimentaire. Ce résultat est en accord avec de précédentes études ayant constaté une augmentation du niveau de performance sur des tests de puissance après une perte de poids (Mero et al., 2010; Mettler et al., 2010; Robinson et al., 2015). Ce phénomène serait permis par une réduction de la masse grasse, permettant une amélioration du ratio $\frac{\text{Puissance}}{\text{Poids}}$ (Fogelholm et al., 1993; Mettler et al., 2010; Viitasalo et al., 1987). Néanmoins, il est troublant de constater dans nos résultats que la variation significative n'est valable que pour le mouvement de l'arraché. L'absence de variation sur le test du CMJ pourrait s'expliquer par l'engagement des sportifs, le test ayant eu lieu 20 minutes avant le début de la compétition simulée. Même si l'épreuve n'était pas officielle, les conditions environnementales et les enjeux de sélection étaient réels. De ce fait, il n'est pas à écarter que l'engagement mental et physique des sportifs n'était pas maximal dans la perspective de se préserver pour la compétition simulée. D'autre part, la différence relevée entre les mouvements de l'arraché et de l'EJ semble confirmer les observations du monde sportif indiquant que la phase de perte de

poids précompétitive aurait des répercussions plus négatives à l'EJ. L'analyse des résultats individuels montre que sur les 6 haltérophiles du groupe Restriction, 5 ont amélioré leur performance relative à l'arraché [+3.7 ; +11.5], le dernier ayant maintenu son niveau de performance. A l'EJ, 4 haltérophiles ont augmenté leur performance [+2.0 ; +16.5] alors que 2 ont éprouvé une diminution (-2.5 ; -1.9). Ces différences pourraient trouver une justification à 2 niveaux. Tout d'abord, le mouvement de l'EJ présente une sollicitation plus importante des qualités de force maximale ; les charges mobilisées étant plus importantes que sur le mouvement de l'arraché (Storey & Smith, 2012). Or, les résultats de la littérature indiquent que la restriction alimentaire est associée à une diminution des capacités de force maximale (Degoutte et al., 2006; Jlid et al., 2013; Mero et al., 2010; Mettler et al., 2010; Robinson et al., 2015; Roemmich & Sinning, 1997b; Viitasalo et al., 1987). De plus, le mouvement de l'EJ étant réalisé dans la seconde partie de la compétition, il n'est pas à exclure que la restriction alimentaire ait altéré les capacités de récupération et accentué le phénomène de fatigue, probablement sous l'effet des faibles apports glucidiques ($2.8 \text{ g.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$) (Achten et al., 2004; Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001; Horswill et al., 1990; Koral & Dosseville, 2009).

c) Amélioration de la performance absolue pour le groupe Contrôle

Si la performance relative est un indicateur intéressant, la performance absolue, mesurée en kilogrammes, reste la marque de référence du classement en haltérophilie. Bien que la restriction alimentaire n'ait pas induit de variation significative chez le groupe Restriction, les haltérophiles du groupe Contrôle ont amélioré significativement leur performance sur le mouvement de l'EJ (+4.4%) et du total Olympique (+3.8%). Sur les 5 haltérophiles du groupe Contrôle, 4 sur 5 ont amélioré leur performance absolue sur le mouvement de l'arraché [+1kg ; +5kg] et tous ont amélioré leur performance absolue sur le mouvement de l'EJ [+1kg ; +10kg]. Dès lors, les résultats observés chez le groupe Contrôle pourraient indiquer

une altération des adaptations à l'entraînement et du développement de la performance absolue causée par la restriction des apports nutritionnels.

XI.2. Influence sur les paramètres psychologiques

À notre connaissance, notre étude est la première à avoir mesuré de manière concomitante les apports alimentaires et les paramètres psychologiques, mesurés par les questionnaires du POMS et du RESTQ-Sport chez des haltérophiles de haut niveau au cours d'une perte de poids rapide. Nos résultats mettent en lumière qu'une réduction rapide de 4.34% du poids du corps induisait une altération des paramètres de stress et de récupération évalués par le questionnaire du RESTQ-Sport, sans modification des paramètres de l'humeur mesurés par le questionnaire du POMS.

a) Des résultats différents selon le questionnaire utilisé

Les résultats au questionnaire du POMS ont montré que les haltérophiles des deux groupes étaient caractérisés par un profil en « iceberg » à T₁, identifié comme un profil favorable à la performance (Beedie et al., 2000; Morgan et al., 1987). A la suite de la période de restriction alimentaire, le profil en « iceberg » n'était pas maintenu chez les sujets du groupe Restriction. Néanmoins, aucune variation significative n'a été observée sur les scores du POMS, bien que des augmentations de 8 à 10% aient été constatées sur les items négatifs du POMS (i.e. tension, dépression, confusion, fatigue, colère). L'absence de significativité sur ces résultats pourrait s'expliquer par les écarts-types observés [11% ; 24%]. Inversement, les résultats au questionnaire du RESTQ-Sport reflétaient des changements spécifiques au groupe Restriction, caractérisés par une diminution significative du score de récupération globale et générale,

ainsi qu'une augmentation significative du score de stress global et général à T₃ en comparaison avec T₂. L'inversion du profil en « iceberg » et l'altération des scores de stress et de récupération, mesurées par le questionnaire du POMS et du RESTQ-Sport, respectivement, tendent à confirmer que la restriction alimentaire affecte les paramètres psychologiques (Degoutte et al., 2006; Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001; Hall & Lane, 2001; Horswill et al., 1990; Jlid et al., 2013; Koral & Dosseville, 2009; Marttinen et al., 2011; Mettler et al., 2010). Inversement, d'autres auteurs n'ont pas observé de variation significative de l'humeur à la suite de phases de déficit énergétique rapide (Helms et al., 2015; Mettler et al., 2010) ou progressive (Robinson et al., 2015). L'amélioration de l'apparence physique, sous l'effet de la perte de poids, pourrait avoir un effet bénéfique sur certains paramètres de l'humeur, notamment la dépression (Mero et al., 2010). De plus, notre étude a utilisé 2 questionnaires différents pour mesurer les paramètres psychologiques. Des études précédentes ont également rapporté une divergence dans les résultats observés selon le questionnaire utilisé. Un régime hypocalorique de 14 jours entraînait une altération des scores mesurés par le questionnaire du *Daily Analysis of Life Demands for Athletes* (DALDA), alors qu'aucune variation significative n'était observée sur les scores mesurés par le questionnaire du POMS (Mettler et al., 2010). Ces résultats indiqueraient que l'impact de la restriction alimentaire sur les paramètres psychologiques pourrait être influencé par le type de questionnaires utilisés. Au regard de nos résultats, le questionnaire du RESTQ-Sport semblerait plus sensible à l'impact de la restriction alimentaire sur les paramètres psychologiques chez des haltérophiles de haut niveau. Enfin, les stratégies alimentaires utilisées pour la perte de poids pourraient expliquer les différences rapportées dans la littérature (Fogelholm et al., 1993; Viitasalo et al., 1987; Wilson et al., 2012). La restriction des apports glucidiques, lors d'une période de restriction alimentaire, a été associée à une modification des paramètres psychologiques (Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001; Horswill et al., 1990). Il a également été proposé que des apports

protidiques élevés ($2.8 \text{ g.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$) pouvaient limiter l'altération des indicateurs psychologiques mesurés par les questionnaires du POMS et du DALDA (Helms et al., 2015). Cependant, l'intérêt d'un régime hyperprotidique reste en débat au regard des résultats contradictoires observés auparavant (Mettler et al., 2010). De la même manière, les méthodes de déshydratation, notamment par l'intermédiaire d'une utilisation excessive du sauna, pourrait avoir une influence négative sur certains paramètres psychologiques, notamment l'agressivité (Viitasalo et al., 1987). Dans une étude récente, des corrélations négatives et significatives ont été constatées entre le niveau de fatigue perçue et la disponibilité énergétique, ainsi que les apports caloriques (Schaal et al., 2016). Ces éléments impliqueraient, qu'au-delà du choix des apports alimentaires, l'impact sur les paramètres psychologiques serait majoritairement en lien avec l'apport calorique global et la disponibilité énergétique.

b) Les apports en vitamines et les paramètres psychologiques

La restriction alimentaire associée à la perte de poids rapide augmente le risque de carences nutritionnelles en certaines vitamines (Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001; Fogelholm et al., 1993; Reljic et al., 2015). Les micronutriments sont directement ou indirectement impliqués dans un certain nombre de processus cognitifs (Angelo et al., 2015). De plus, le métabolisme glucidique nécessite l'intervention de plusieurs vitamines dont la thiamine (B1), la riboflavine (B2), la niacine (B3) et la vitamine B6 qui fonctionnent comme des cofacteurs enzymatiques. Certains minéraux, comme le magnésium, le fer et le manganèse sont également nécessaires pour assurer le bon fonctionnement du système métabolique. Dans notre étude, la restriction alimentaire a induit une diminution des apports en vitamines B1, B2, B6, magnésium, calcium, fer et sodium par rapport à la période à poids constant. De plus, les apports en vitamines E, B6, B9, B12, magnésium, calcium et fer étaient inférieurs aux recommandations (Vidailhet, 2004). Cependant, nous n'avons noté aucune corrélation entre les apports en

micronutriments et les paramètres psychologiques. Ce résultat pourrait s'expliquer par le fait qu'un apport insuffisant en vitamines n'implique pas une diminution immédiate des concentrations plasmatiques (Fogelholm et al., 1993; Reljic et al., 2015). Des facteurs comme la digestibilité des aliments pourraient influencer la biodisponibilité des vitamines et, par conséquent, les valeurs mesurées au niveau plasmatique. A titre d'exemple, il a été observé que l'ingestion de produits d'origine animale permettait une assimilation de la vitamine B6 10% supérieure à celle mesurée dans les produits d'origine végétale (Roth-Maier et al., 2002). Dans notre étude, l'analyse des prélèvements de sang capillaire n'a pas révélé de modification significative des indicateurs biochimiques (i.e. natrémie, kaliémie, calcémie), malgré la diminution significative des apports (Tableau 4). Il est néanmoins possible d'envisager que la période de restriction alimentaire n'ait pas été suffisamment longue pour provoquer une modification significative des paramètres sanguins.

XI.3. Influence de la restriction alimentaire sur l'activité des systèmes physiologiques du stress

a) Les réponses au réveil

Les principaux résultats de notre étude suggèrent qu'une restriction alimentaire de 6 jours, basée sur les procédures habituelles des haltérophiles, induirait une augmentation significative de l'activité de l' α -amylase salivaire, indiquant une hyperactivité du système SAM, sans variation significative des marqueurs de l'axe HHS (cortisol et DHEA).

De précédentes études ont montré une hyperactivité de l'axe HHS chez les sujets présentant une restriction chronique de leurs apports alimentaires (Anderson, Shapiro, Lundgren, Spataro, & Frye, 2002; Filaire et al., 2015; Monteleone et al., 2011; Oskis, Loveday,

Hucklebridge, Thorn, et al., 2012; Oskis, Loveday, Hucklebridge, Wood, et al., 2012) ou aigüe (Tomiya et al., 2010). Chez les sujets souffrant d'anorexie nerveuse, l'hyperactivité de l'axe HHS était caractérisée par une augmentation des valeurs du CAR (Filaire et al., 2015) ou une augmentation des concentrations salivaires du cortisol et de la DHEA (Monteleone et al., 2011; Oskis, Loveday, Hucklebridge, Thorn, et al., 2012; Oskis, Loveday, Hucklebridge, Wood, et al., 2012). La phase de rémission, chez une patiente atteinte d'anorexie nerveuse, était par ailleurs associée à une diminution de l'activité de l'axe HHS, permettant une « normalisation » des concentrations salivaires du cortisol et de la DHEA en comparaison à un groupe de sujets sains (Oskis, Loveday, Hucklebridge, Wood, et al., 2012). De même, une restriction volontaire des apports alimentaires a été associée à une augmentation des concentrations salivaires du cortisol chez des femmes ne présentant pas de pathologies d'ordre psychiatrique (Anderson et al., 2002). Enfin, des jeunes femmes soumises à une restriction de leurs apports caloriques (1200 kcal.j^{-1}), sur une période de 3 semaines, présentaient également une augmentation de la concentration salivaire du cortisol (Tomiya et al., 2010). L'influence de la restriction des apports nutritionnels sur l'activité de l'axe HHS s'expliquerait par le rôle régulateur du cortisol sur la balance énergétique et le comportement alimentaire (Nieuwenhuizen & Rutters, 2008). La diminution de la disponibilité énergétique activerait un ensemble de phénomènes physiologiques permettant la régulation de l'homéostasie énergétique par une mobilisation des ressources énergétiques intracellulaires, mais également par une stimulation de la prise alimentaire (Tomiya et al., 2010). Dans cette perspective, le cortisol favoriserait la mobilisation des réserves énergétiques intracellulaires, de par son action sur les processus de la glycogénolyse et de la lipolyse au niveau musculaire et hépatique, ainsi que de la néoglucogenèse au niveau hépatique (Chrousos, 2009; Djurhuus et al., 2002; Kraemer & Ratamess, 2005; Rabasa & Dickson, 2016; Viru & Viru, 2004). De plus, le cortisol provoque une diminution de la sensibilité

tissulaire à l'insuline, ce qui contribue à réduire l'assimilation intracellulaire du glucose (Chrousos, 2009; Chrousos & Kino, 2009). Enfin, le cortisol stimulerait la libération du neuropeptide Y (NPY) au niveau de l'hypothalamus, qui présente un effet orexigène, tout en inhibant la libération de leptine, qui présente un effet anorexigène. Le rétrocontrôle négatif, réalisé sur la *Corticotropin Releasing Hormone* (CRH), qui présente une action physiologique opposée à celle du cortisol au niveau de la leptine et du NPY, serait un mécanisme supplémentaire de régulation du comportement alimentaire par le cortisol. La combinaison de ces facteurs métaboliques et comportementaux aurait un effet stimulant sur la prise alimentaire et la libération énergétique au niveau plasmatique (Nieuwenhuizen & Rutters, 2008). La libération de l'interleukine 6 (IL-6), induite par la déplétion des réserves glycogéniques, contribuerait également à l'activation de l'axe HHS (Chrousos & Gold, 1992; Abdelmalek et al., 2015). Au-delà de l'impact physiologique, un comportement alimentaire restrictif représenterait également un facteur de stress d'ordre psychologique, contribuant aussi à la stimulation de l'axe HHS (Berthoud, 2004; Nieuwenhuizen & Rutters, 2008).

D'autres études n'ont pas observé de variation des concentrations salivaires ou plasmatiques du cortisol chez des sujets soumis à des régimes hypocaloriques (Anderson et al., 2002; Mettler et al., 2010; Roemmich & Sinning, 1997a; Scavo, Barletta, Buzzetti, & Vagiri, 1988; Tam et al., 2014; Tomiyama et al., 2010). Après 2 mois de régime hypocalorique (800-1100 kcal.j⁻¹), Scavo et al. (1988) ont constaté une diminution des concentrations plasmatiques d'ACTH et du cortisol chez des sujets obèses (BMI = 32.2 kg.m⁻²). Dans le cadre d'un régime hypocalorique de 6 mois, consistant en une réduction de 25% des AET habituels et aboutissant à une perte de poids de 10% chez des sujets obèses, aucune variation significative des concentrations salivaires du cortisol n'a été observée (Tam et al., 2014). Enfin, les travaux de Tomiyama et de ses collaborateurs (2010) ont mis en évidence des résultats contradictoires. Si la réponse globale du cortisol salivaire, mesurée par la valeur de l'AUCg

sur la journée, témoignait d'une hyperactivité de l'axe HHS, l'absence de modification du CAR semblait indiquer un phénomène de stabilisation (Tomiyama et al., 2010). Certains auteurs ont émis l'hypothèse qu'une modification du métabolisme du cortisol pouvait masquer une réelle variation des concentrations hormonales, laissant envisager un impact de la restriction calorique sur le métabolisme du cortisol. Cependant, les caractéristiques des participants (i.e. sexe, pathologies), les modalités de la restriction calorique (i.e. durée, ampleur de la restriction), mais également des indicateurs utilisés pourraient expliquer ces divergences.

A notre connaissance, les études portant sur l'influence de la restriction alimentaire sur les hormones du cortex surrénalien ont principalement mesuré les concentrations plasmatiques de la DHEAS. Ce phénomène semble être expliqué par le fait que les concentrations plasmatiques de la DHEAS sont largement supérieures à celles de la DHEA (Vinning et al., 1983). Dans le cadre de ces travaux, une augmentation des concentrations plasmatiques de la DHEAS a été observée en réponse à différentes périodes de restriction alimentaire (Jakubowicz et al., 1995; Pasiakos et al., 2011). Une restriction alimentaire de 2 jours (i.e. 1346 kJ.j⁻¹) entraînait une augmentation significative de la concentration plasmatique de la DHEAS chez un groupe de jeunes adultes sains (Pasiakos et al., 2011). De la même manière, la concentration plasmatique de la DHEAS était significativement augmentée après un régime hypocalorique de 2 mois (i.e. 4200-5800 kJ.j⁻¹) chez des hommes et des femmes souffrant d'obésité (Jakubowicz et al., 1995). L'augmentation de la concentration plasmatique de la DHEAS serait la conséquence de la diminution de la sécrétion d'insuline, causée par la baisse de la glycémie lors de la période de restriction alimentaire (Jakubowicz et al., 1995). En effet, l'insuline stimulerait les processus de dégradation métabolique de la DHEAS, contribuant à réduire les concentrations plasmatiques de la DHEAS (Jakubowicz et al., 1995). De plus, l'augmentation de la DHEAS inhiberait la sécrétion de la leptine, contribuant, de ce fait, à la

régulation du comportement alimentaire (Pasiakos et al., 2011). Dans notre étude, les concentrations salivaires d'insuline n'ont pas été mesurées, ce qui limite nos capacités d'interprétation au regard de l'absence de variation de la concentration salivaire de la DHEA. Chez les populations sportives, les études ayant mesuré la réponse des systèmes physiologiques du stress à la suite d'une restriction alimentaire rapide sont rares et peu concluantes. Une hyperactivité de l'axe HHS, sous la forme d'une augmentation de la concentration plasmatique de repos d'ACTH, du cortisol et de la DHEA a été observée chez des judokas de haut niveau pratiquant une restriction alimentaire de courte durée (6 jours) (Degoutte et al., 2006). Cependant, d'autres auteurs ont observé des résultats contradictoires. Les concentrations plasmatiques du cortisol n'étaient pas modifiées à la suite d'une restriction alimentaire de 2 semaines (Mettler et al., 2010) ou à la suite de périodes de restriction alimentaire répétées (Roemmich & Sinning, 1997a). De la même manière, un état de déficit énergétique de 4 semaines, lors d'une période d'entraînement intensif, n'entraînait pas de variation significative des concentrations salivaires du cortisol chez des nageuses de haut niveau (Schaal et al., 2016). Parallèlement, une augmentation de la concentration salivaire de la ghréline et une diminution de la concentration salivaire de la leptine étaient constatées. Ces résultats traduisaient une altération des hormones régulatrices du comportement alimentaire, en l'absence de variation du cortisol (Schaal et al., 2016). Etant donné que ces indicateurs n'ont pas été mesurés dans notre étude, il n'est pas possible de savoir si l'absence de variation de l'activité de l'axe HHS était associée à une modification des concentrations de la leptine et de la ghréline.

L'absence de variation de l'activité de l'axe HHS pourrait être expliquée par un phénomène adaptatif en réponse à une exposition répétée au stress (Schommer et al., 2003; Yoon & Weierich, 2016). En effet, certains travaux portant sur les réponses de l'axe HHS au réveil ont observé une atténuation, voire une absence de réponse au réveil, dans le cadre de stress

chronique (Clow et al., 2004; Huber et al., 2006; Pruessner et al., 1999). Ce phénomène a été précédemment décrit comme un mécanisme adaptatif permettant de protéger l'organisme contre les effets délétères, notamment au niveau du système immunitaire, d'une production excessive de cortisol (Yoon & Wieirich., 2016). D'autres auteurs ont proposé que les stratégies de coping et l'expérience des sportifs de haut niveau face au stress compétitif, pouvaient expliquer l'absence de variation du CAR observée le matin des jours de compétition, en comparaison aux jours de référence (Diaz et al., 2013). Dans notre étude, les haltérophiles avaient un haut niveau de pratique et une expérience avérée de la restriction alimentaire avant les compétitions. Au regard de ces éléments, nous avons émis l'hypothèse que l'exposition répétée au stress de la restriction alimentaire pouvait avoir induit une adaptation de l'axe HHS chez les participants de notre étude, se traduisant par une stabilisation des réponses du cortisol et de la DHEA au stress du réveil. Ce mécanisme adaptatif permettrait de protéger l'organisme des effets néfastes d'une libération excessive de cortisol (Yoon & Wieirich., 2016). Néanmoins, nous n'excluons pas la possibilité que le déficit énergétique, engendré par la restriction alimentaire, n'ait pas été suffisant pour générer une réponse significative de l'axe HHS (Anderson et al., 2002).

Inversement, nous avons constaté une augmentation significative de l'activité de l' α -amylase salivaire en réponse au réveil, traduisant une hyperactivité du système SAM, à la suite de la période de restriction alimentaire. Précédemment, une hypoactivité du système SAM avait été observée chez des sujets présentant une réduction chronique de leurs apports caloriques (Filaire et al., 2015; Monteleone et al., 2011). A l'instar de l'axe HHS, l'activité du système SAM aurait une influence sur le comportement alimentaire et le contrôle de la balance énergétique ; l'activation du SNS ayant été associée à une diminution de la prise alimentaire (Zouhal, Lemoine-Morel, Mathieu, Casazza, & Jabbour, 2013). Cependant, d'autres résultats nous amènent à penser que la perturbation de l'homéostasie énergétique pourrait stimuler

l'activité du système SAM. Une hyperactivité du système SAM, caractérisée par une augmentation de l'activité de l' α -amylase salivaire en réponse au stress du réveil a été notée après 16 semaines d'entraînement intense chez des joueuses de tennis de haut niveau (Filaire et al., 2013). Nater et al. (2007) ont précédemment associé un état de stress chronique avec l'augmentation de l'activité de l' α -amylase salivaire. Dès lors, la modification de l'activité de l' α -amylase salivaire au réveil, observée dans notre étude, représenterait une hyperactivité du système SAM en réponse à une situation de déficit énergétique. La diminution significative de la glycémie (-9%), relevée entre T₁ et T₃, confirmerait que la restriction des apports énergétiques s'est traduite par une altération de l'homéostasie glucidique. L'hyperactivité du système SAM aurait pour fonction d'assurer la mobilisation des ressources énergétiques intracellulaires, notamment des réserves lipidiques, permettant la régulation de l'homéostasie énergétique (Nater & Rohleder, 2009; Zouhal et al., 2013). L'augmentation de l'activité de l' α -amylase salivaire pourrait également indiquer une stimulation de son action digestive, favorisant l'hydrolyse des molécules glucidiques issues de l'alimentation (Nater & Rohleder, 2009). Par conséquent, il est possible que l'augmentation de l'activité de l' α -amylase salivaire observée dans notre étude témoigne à la fois d'une hyperactivité du système SAM, mais également d'une adaptation localisée favorisant l'approvisionnement énergétique. De plus, les corrélations entre les indicateurs relatifs à l'activité de l' α -amylase salivaire et certains items des questionnaires du POMS et du RESTQ-Sport tendent à confirmer le lien entre l'activité du système SAM et les aspects psychologiques à la suite d'une période de stress (Filaire et al., 2013). Cependant, nos résultats notent une relation positive entre la réactivité de l' α -amylase salivaire au réveil et le score de l'item de récupération générale mesuré par le RESTQ-Sport, ce qui semble opposé aux observations de Filaire et al. (2013). La divergence de ces résultats pourrait s'expliquer par les caractéristiques de la période de stress appliquée dans chacune de ces études (i.e. phase d'entraînement intensif vs restriction calorique). Dans nos travaux, et au

regard des mécanismes physiologiques compensatoires mis en avant dans la réponse à la restriction calorique, il est possible d'envisager une influence bénéfique de l'hyperactivité du système SAM sur les paramètres psychologiques. Néanmoins, ce phénomène reste spéculatif et nécessiterait des études complémentaires pour être éclairci.

Bien qu'elle n'était pas significative, une augmentation du ratio α -amylase/Cortisol (AOCg) (+45%, $p=0.11$) était observée à la suite de la période de restriction alimentaire. L'absence de significativité pourrait être liée à la forte variabilité interindividuelle observée [-6.0% ; +151.4%], ainsi qu'à la faiblesse de notre échantillon. Néanmoins, la variation du ratio AOCg entre le début et la fin de la période de restriction alimentaire chez le groupe Restriction était significativement différente de celle du groupe Contrôle (ES=1.06). Ces résultats suggèreraient que la restriction alimentaire a induit une altération de la coordination des 2 systèmes physiologiques, précédemment décrite comme le témoin d'un état de stress (Ali & Pruessner, 2012; Filaire et al., 2013).

Au regard de ces éléments, les résultats de notre étude mettent en avant que la restriction alimentaire a engendré un stress physiologique, caractérisée par une hyperactivité du système SAM et une stabilisation de l'axe HHS en réponse au stress du réveil. Nos résultats suggèrent (1) que la restriction alimentaire induirait une hyperactivité du système SAM permettant la mobilisation des ressources énergétiques intracellulaires afin de répondre à la situation de déficit énergétique ; (2) que l'augmentation de l'activité enzymatique de l' α -amylase salivaire représenterait également une adaptation physiologique localisée, favorisant un approvisionnement énergétique rapide ; et (3) que la stabilisation de l'activité de l'axe HHS pourrait être la conséquence d'un phénomène adaptatif liée à la répétition des périodes de restriction énergétique.

b) Les réponses à l'exercice

La période de restriction alimentaire a modifié la réponse des 2 systèmes physiologiques au stress de la compétition simulée, se traduisant par une hypoactivité de l'axe HHS et une hyperactivité du système SAM. Ces résultats indiqueraient qu'une phase de restriction énergétique rapide entraînerait une dissociation des 2 systèmes physiologiques du stress en réponse à un exercice physique.

Chez les sujets du groupe Restriction, la phase de restriction alimentaire s'est traduite par une diminution significative de (1) la concentration salivaire post-arraché du cortisol ; (2) l'aire sous la courbe en référence à l'axe des abscisses de la concentration salivaire du cortisol (AUC_{gsC}) ; et de (3) la variation post-arraché et post-EJ des concentrations salivaires du cortisol. Inversement, la variation post-EJ de la concentration salivaire du cortisol du groupe Contrôle était significativement augmentée (+88.7%) après la période de restriction. De plus, la valeur observée pour le groupe Contrôle était significativement supérieure à la variation observée pour le groupe Restriction. Précédemment, la réduction de la réponse du cortisol à l'exercice a été associée à un état de fatigue et/ou de surmenage (Fry et al., 1998; Viru & Viru, 2004), probablement en conséquence d'un épuisement de l'axe HHS (Viru & Viru, 2004). Bien que les résultats soient divergents, certains auteurs ont observé un lien entre l'augmentation de la concentration salivaire du cortisol à l'exercice et la performance dans les disciplines de force, comme l'haltérophilie et la force athlétique (Passelergue et al., 1995 ; Crewther et al., 2011 ; Le Panse et al., 2012). Néanmoins, nous n'avons pas observé de corrélation significative entre les variations des indicateurs de l'axe HHS et le niveau de performance pour confirmer ces éléments.

L'augmentation des valeurs de l' AUC_{gsAA} (+34.9%), relevée pour le groupe Restriction, suggérerait qu'une restriction alimentaire de courte durée provoquait une hyperactivité du

système SAM en réponse au stress de l'exercice. De plus, l'augmentation du ratio AOCg, relevé chez le groupe Restriction (+684%) à la suite de la période de restriction alimentaire, indiquerait une dissociation de la réponse physiologique au stress de la compétition simulée. Précédemment, la dissymétrie de la réponse des 2 systèmes physiologiques du stress a été décrite comme un mécanisme physiologique, où l'hyperactivité du système SAM compenserait l'hypoactivité de l'axe HHS, permettant de maintenir la fourniture énergétique (Chennaoui et al., 2016). Au regard de ces éléments, la période de restriction alimentaire aurait provoqué une dissociation de la réponse des systèmes physiologiques au stress de l'exercice, caractérisée par une hyperactivité du système SAM et une hypoactivité de l'axe HHS, confirmant ainsi notre hypothèse de départ. Les résultats de notre étude, associés aux précédentes observations de Chennaoui et al. (2016), nous conduisent à envisager que la réactivité du système SAM serait un phénomène compensatoire et nécessaire au maintien de la fourniture énergétique dans le cas d'une hypoactivité de l'axe HHS, lorsque l'organisme est confronté à un stress physique intense. Néanmoins, la dissociation de la réponse des 2 axes a été interprétée comme l'indicateur d'un état de stress pour l'organisme (Ali & Pruessner, 2012; Filaire et al., 2013), et associée à la dégradation du niveau de performance (Chennaoui et al., 2016). De plus, l'amélioration significative du niveau de performance absolue relevée chez le groupe Contrôle suggérerait une progression. Etant donné que les 2 groupes ont été soumis à une charge d'entraînement similaire, il est possible que la restriction des apports nutritionnels ait été un facteur limitant les adaptations à l'entraînement (Paillard, 2006). La réduction des apports glucidiques et/ou la modification des réponses hormonales à l'exercice pourraient expliquer ce phénomène (Filaire, Maso, Degoutte, et al., 2001; Fry et al., 1998; Jlid et al., 2013; Koral & Dosseville, 2009; Viru & Viru, 2004).

XII. LIMITES ET PERSPECTIVES

Ce travail doctoral s'inscrit dans une perspective de recherche appliquée. A ce titre, il dégage des implications pratiques mais aussi certaines limites, à destination des chercheurs en physiologie de l'exercice, mais également des entraîneurs, qu'il est nécessaire de préciser.

XII.1. Limites de l'étude

La taille de notre échantillon est un des points faibles de notre étude. Le petit nombre de participants pourrait expliquer l'absence de différences significatives observée pour certaines variables telles que la performance. Bien qu'un petit échantillon soit encouragé pour maximiser l'homogénéité de l'échantillon, il limite l'extrapolation des résultats à une population plus large. Comme nous l'avons indiqué en introduction, les données relatives à l'influence de la restriction alimentaire sur les indicateurs psychophysiologiques chez les sportifs de haut niveau sont rares et peu concluantes (Degoutte et al., 2006; Mettler et al., 2010; Schaal et al., 2016). En effet, l'accès à ces populations est particulièrement difficile, notamment du fait des contraintes logistiques et temporelles imposées par les protocoles de recherche, et les répercussions potentiellement néfastes sur la préparation du sportif. De plus, le nombre de sportifs de haut niveau représente un effectif extrêmement faible, ce qui rend difficile la constitution de larges échantillons.

D'autre part, il aurait été intéressant de vérifier si la période suivant la pesée se traduisait par une variation significative du poids de corps. Précédemment, des études ont rapporté qu'une période de restauration de 4-5h permettait de récupérer 50 à 73% du poids de corps perdu lors du processus de perte de poids (Artioli, Iglesias, et al., 2010; Fogelholm et al., 1993). Dans notre étude, la durée de la période suivant la pesée était limitée à 2 heures pour se conformer

au déroulement d'une compétition officielle d'haltérophilie. Néanmoins, les apports nutritionnels et hydriques ont été mesurés pour vérifier la stratégie alimentaire utilisée lors de cette phase. Les valeurs relevées étaient inférieures aux valeurs rapportées dans les précédents travaux (Artioli, Iglesias, et al., 2010; Fogelholm et al., 1993; Mendes et al., 2013). De plus, les contraintes temporelles et expérimentales imposées lors de cette phase (i.e. pesée, test de détente, échauffement) rendaient difficile l'intégration d'une nouvelle pesée et représentaient, de notre point de vue, un facteur pouvant déstabiliser la préparation des haltérophiles à la compétition simulée.

XII.2. Conclusion générale

Nos résultats suggèrent qu'une période de restriction alimentaire, au cours d'une phase d'entraînement intensif, se traduit par une hyperactivité du système SAM et une stabilisation de l'axe HHS en réponse au stress du réveil. Ce phénomène s'accompagne également d'une modification des réponses physiologiques au stress de l'exercice, caractérisée par une hyperactivité du système SAM et une hypoactivité de l'axe HHS. Ces résultats illustrent l'impact négatif d'une situation de stress énergétique sur l'activité des systèmes physiologiques du stress. Dans cette perspective, il est intéressant de noter que l'hyperactivité du système SAM est observée dans les 2 paradigmes de stress. Parallèlement, l'activité de l'axe HHS en réponse au stress du réveil semble être maintenue, voire atténuée si l'on observe les réponses au stress de la compétition simulée. Les répercussions physiologiques de la restriction alimentaire étaient également associées à l'altération des paramètres psychologiques. Inversement, le niveau de performance absolue n'a pas été modifié par la situation de déficit énergétique. Nous pouvons en conclure que la restriction alimentaire, telle qu'elle est pratiquée par les haltérophiles de haut niveau en amont des épreuves compétitives,

induit une altération de l'intégrité psychophysiologique de l'individu et semblerait limiter le développement de la performance sportive.

XII.3. Perspectives

Nos résultats confirment l'utilité des indicateurs psychophysiologiques dans le suivi et la prévention des phénomènes de fatigue chez le sportif de haut niveau (Filaire et al., 2003; Purge et al., 2006), et incitent à poursuivre leur exploitation dans le cadre des recherches portant sur l'impact de la restriction alimentaire.

Il nous semble nécessaire de vérifier si la dissociation chronique de la réponse des 2 systèmes physiologiques du stress résulte en des effets néfastes sur la santé des sportifs, et notamment sur le développement des troubles du comportement alimentaire et/ou une altération du métabolisme énergétique. Cette question nécessiterait un suivi longitudinal des sportifs engagés dans des pertes de poids fréquentes, au travers des marqueurs salivaires du stress utilisés dans notre étude, mais également des marqueurs complémentaires, tels que la leptine, la ghréline et l'insuline. Ces informations permettraient de mettre en lumière les adaptations potentielles de l'activité des systèmes physiologiques du stress, ainsi que des marqueurs de l'homéostasie glucidique (i.e. insuline) et du comportement alimentaire (i.e. leptine et ghréline). L'évaluation du comportement alimentaire, par le biais de questionnaires associés à des entretiens semi-directifs, permettrait d'apprécier l'évolution des habitudes alimentaires chez les sportifs et de détecter d'éventuelles dérives pouvant être néfastes pour la santé. Dans cette perspective, il semble également nécessaire d'approfondir ces travaux en explorant les réponses adaptatives chez les athlètes féminines, afin de déterminer d'éventuelles différences et de leur proposer des prescriptions stratégiques adaptées. En effet, de nombreux auteurs ont rapporté une prévalence des troubles du comportement alimentaire chez les athlètes féminines en comparaison à leurs homologues masculins (Turocy et al., 2011). D'autre part, certaines

études ont mis en avant des adaptations hormonales différentes, entre les sujets masculins et féminins, en réponse à une période de restriction énergétique (Jakubowicz et al., 1995).

De nombreux auteurs ont mis en avant les avantages d'une perte de poids progressive, comparativement à une perte de poids rapide, notamment sur le maintien du niveau de performance (Fogelholm et al., 1993; Garthe et al., 2011). Au regard des précédents éléments, il paraîtrait judicieux de comparer l'influence des 2 modalités sur l'activité des systèmes physiologiques du stress, ainsi que sur les réponses hormonales à l'exercice. Dans ce cadre, de précédents travaux ont mis en avant l'utilisation concomitante de l' α -amylase salivaire avec une autre protéine salivaire, la Chromogranine A (CgA) (Bocanegra et al., 2012; Chennaoui et al., 2016; Diaz, Bocanegra, Teixeira, Soares, & Espindola, 2012; Hua et al., 2014). La CgA a été décrit comme un indicateur fiable de l'activité du système SAM et permettrait de refléter l'intensité du stress psychologique de la situation (Hua et al., 2014).

Enfin, de récents travaux ont mis en avant le rôle central de l'axe intestin-cerveau dans le contrôle des réponses neuroendocriniennes et émotionnelles au stress. Dans ce cadre, le microbiote intestinal, qui est une communauté microbienne située au niveau du tube digestif, aurait un rôle majeur (Rabot, 2015). La modification du comportement alimentaire pourrait perturber l'équilibre du microbiote intestinal et avoir des répercussions néfastes sur les réponses adaptatives au stress. Il nous paraît intéressant d'approfondir cet axe de recherche chez les sportifs de haut niveau qui soumettent leur organisme à de brutales variations de leurs apports alimentaires et vérifier si ces pratiques peuvent présenter des perturbations significatives sur le microbiote intestinal.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdelmalek, S., Chtourou, H., Souissi, N., & Tabka, Z. (2015). Caloric Restriction Effect on Proinflammatory Cytokines, Growth Hormone, and Steroid Hormone Concentrations during Exercise in Judokas. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2015, 1–8.
- Achten, J., Halson, S. L., Moseley, L., Rayson, M. P., Casey, A., & Jeukendrup, A. E. (2004). Higher dietary carbohydrate content during intensified running training results in better maintenance of performance and mood state. *Journal of Applied Physiology*, 96(4), 1331–1340.
- Aerenhouts, D., Deriemaeker, P., Hebbelinck, M., & Clarys, P. (2011). Energy and macronutrient intake in adolescent sprint athletes : A follow-up study. *Journal of Sports Sciences*, 29(1), 73–82.
- Ahtiainen, J. P., Pakarinen, A., Alen, M., Kraemer, W. J., & Häkkinen, K. (2005). Short vs. long rest period between the sets in hypertrophic resistance training: influence on muscle strength, size, and hormonal adaptations in trained men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 19(3), 572–582.
- Ali, N., & Pruessner, J. C. (2012). The salivary alpha amylase over cortisol ratio as a marker to assess dysregulations of the stress systems. *Physiology & Behavior*, 106, 65–72.
- Alix-Sy, D., Le Scanff, C., & Filaire, E. (2008). Psychophysiological responses in the pre-competition period in elite soccer players. *Journal of Sports Science and Medicine*, 7, 446–454.
- Anderson, D. A., Shapiro, J. R., Lundgren, J. D., Spataro, L. E., & Frye, C. A. (2002). Self-reported dietary restraint is associated with elevated levels of salivary cortisol. *Appetite*, 38, 13–17.
- Angelo, G., Drake, V., & Frei, B. (2015). Efficacy of multivitamin/mineral supplementation to reduce chronic disease risk: a critical review of the evidence from observational studies and randomized controlled trials. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(14), 1968–1991. [http://doi.org/\[Epub ahead of print\]](http://doi.org/[Epub ahead of print])
- Artioli, G., Gualano, B., Franchini, E., Scagliusi, F., Takesian, M., Fuchs, M., & Lancha Junior, A. (2010). Prevalence, magnitude, and methods of rapid weight loss among judo competitors. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(3), 436–42.
- Artioli, G., Iglesias, R., Franchini, E., Gualano, B., Kashiwagura, D., Solis, M., ... Lancha Junior, A. (2010). Rapid weight loss followed by recovery time does not affect judo-related performance. *Journal of Sports Sciences*, 28(1), 21–32.
- Artioli, G., Saunders, B., Iglesias, R., & Franchini, E. (2016). It is Time to Ban Rapid Weight Loss from Combat Sports. *Sports Medicine*, 1–6.

- Ball, D. (2015). Metabolic and endocrine response to exercise: Sympathoadrenal integration with skeletal muscle. *Journal of Endocrinology*, 224(2), R79–R95.
- Beedie, C., Terry, P., & Lane, A. (2000). The profile of mood states and athletic performance: two meta-analyses. *Journal of Applied Sport Psychology*, 12, 49–68.
- Berthoud, H. (2004). Mind versus metabolism in the control of food intake and energy balance, 81, 781–793.
- Bijlani, R., & Sharma, K. (1980). Effect of dehydration and a few regimes of rehydration on human performance. *Indian Journal of Physiology and Pharmacology*, 24, 255–266.
- Bocanegra, O. L., Diaz, M. M., Teixeira, R. R., Soares, S. S., & Espindola, F. S. (2012). Determination of the lactate threshold by means of salivary biomarkers: Chromogranin A as novel marker of exercise intensity. *European Journal of Applied Physiology*, 112(9), 3195–3203.
- Booij, S. H., Bos, E. H., Bouwmans, M. E. J., & Faassen, M. Van. (2015). Cortisol and α -Amylase Secretion Patterns between and within Depressed and Non- Depressed Individuals. *PLoS ONE*, 10(7), e0131002.
- Borg, G. (1990). Psychophysical scaling with applications in physical work and the perception of exertion. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, 16(c), 55–58.
- Bornstein, S., & Chrousos, G. (1999). Adrenocorticotropin (ACTH) - and Non-ACTH-Mediated Regulation of the Adrenal Cortex: Neural and. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 84(5), 1729–1736.
- Boudarène, M., Legros, J. J., & Timsit-Berthier, M. (2002). Etude de la réponse de stress: rôle de l'anxiété, du cortisol et du DHEAs. *Encéphale*, 28, 139–146.
- Brownell, K., Steen, S., & Wilmore, J. (1987). Weight regulation practices in athletes: analysis of metabolic and health effects. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 19, 546–556.
- Burke, L. (2007). Weight-making sports. In L. Burke (Ed.), *Practical Sports Nutrition* (Human Kine, pp. 289–312). Champaign, IL.
- Burke, L., Hawley, J., Wong, S., & Jeukendrup, A. (2011). Carbohydrates for training and competition. *Journal of Sports Sciences*, 29(November 2014), S17–S27.
- Campos, J., Poletaev, P., Cuesta, A., Pablos, C., & Carratala, V. (2006). Kinematical analysis of the snatch in elite male junior weightlifters of different weight categories. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(4), 843–850.
- Castagna, C., Ganzetti, M., Ditroilo, M., Giovannelli, M., Rocchetti, A., & Manzi, V. (2013). Concurrent validity of vertical jump performance assessment systems. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(3), 761–8.

- Cayrou, S., Dickes, P., Gauvain-Picquard, A., Dolbeault, S., Callahan, S., & Roge, B. (2000). Validation de la traduction française du Profile of Mood States (POMS). *Psychologie et Psychométrie*, 21, 5–22.
- Cengiz, A. (2015). Effects of self-selected dehydration and meaningful rehydration on anaerobic power and heart rate recovery of elite wrestlers. *The Journal of Physical Therapy Science*, 27, 1441–1444.
- Chatterton, R. T., Vogelsong, K. M., Lu, Y. C., Ellman, A., & Hudgens, G. (1996). Salivary alpha-amylase as a measure of endogenous adrenergic activity. *Clinical Physiology (Oxford, England)*, 16(4), 433–448.
- Chennaoui, M., Bougard, C., Drogou, C., Langrume, C., Miller, C., Gomez-Merino, D., & Vergnoux, F. (2016). Stress Biomarkers, Mood States, and Sleep during a Major Competition: “Success” and “Failure” Athlete's Profile of High-Level Swimmers. *Frontiers in Physiology*, 7, 94.
- Chiodo, S., Tessitore, A., Cortis, C., Cibelli, G., Lupo, C., Ammendolia, A., ... Capranica, L. (2011). Stress-related hormonal and psychological changes to official youth Taekwondo competitions. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 21, 111–119.
- Choma, C., Sforzo, G., & Keller, B. (1998). Impact of rapid weight loss on cognitive function in collegiate wrestlers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 30(5), 746–9.
- Chrousos, G. (2009). Stress and disorders of the stress system. *Nature Reviews Endocrinology*, 5, 374–381.
- Chrousos, G., & Gold, P. (1992). The concepts of stress and stress system disorders . Overview of physical and behavioral homeostasis. *JAMA*, 267(9), 1244–1252.
- Chrousos, G., & Kino, T. (2009). Glucocorticoid Signaling in the Cell: Expanding Clinical Implications to Complex Human Behavioral and Somatic Disorders. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1179, 153–166.
- Clow, A., Hucklebridge, F., Stalder, T., Evans, P., & Thorn, L. (2010). The cortisol awakening response: More than a measure of HPA axis function. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 35(1), 97–103.
- Clow, A., Thorn, L., Evans, P., & Hucklebridge, F. (2004). The awakening cortisol response: methodological issues and significance. *Stress (Amsterdam, Netherlands)*, 7(March), 29–37.
- Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychology Bulletin*, 112(1), 155–159.
- Crewther, B. T., Cook, C. J., Lowe, T., Weatherby, R. P., & Gill, N. (2011). The effects of short-cycle sprints on power, strength, and salivary hormones in elite rugby players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(1), 32–39.

- Crewther, B. T., Heke, T., & Keogh, W. (2011). The effects of training volume and competition on the salivary cortisol concentrations of olympic weightlifters. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(1), 10–15.
- D'Anci, K., Vibhakar, A., Kanter, J., Mahoney, C., & Taylor, H. (2009). Voluntary dehydration and cognitive performance in trained college athletes. *Perceptual and Motor Skills*, 109, 251–269.
- D'Anci, K., Watts, K., Kanarek, R., & Taylor, H. (2009). Low-carbohydrate weight-loss diets. Effects on cognition and mood. *Appetite*, 52, 96–103.
- Da Silva Santos, J. F., Takito, M. Y., Artioli, G. G., & Franchini, E. (2016). Weight loss practices in Taekwondo athletes of different competitive levels. *Journal of Exercise Rehabilitation*, 12(3), 202–208.
- Degoutte, F., Jouanel, P., Bègue, R. J., Colombier, M., Lac, G., Pequignot, J. M., & Filaire, E. (2006). Food restriction, performance, biochemical, psychological, and endocrine changes in judo athletes. *International Journal of Sports Medicine*, 27(1), 9–18. <http://doi.org/10.1055/s-2005-837505>
- Degoutte, F., Jouanel, P., & Filaire, E. (2003). Energy demands during a judo match and recovery. *British Journal of Sports Medicine*, 37(3), 245–9.
- Derwin, P. (1990). The snatch: technical description and periodization program. *NSCA Journal*, 12(2), 6–20.
- Diaz, M., Bocanegra, O., Teixeira, R., Soares, S., & Espindola, F. (2012). Response of salivary markers of autonomic activity to elite competition. *International Journal of Sports Medicine*, 33(9), 763–768.
- Diaz, M., Bocanegra, O., Teixeira, R., Tavares, M., Soares, S., & Espindola, F. (2013). The relationship between the cortisol awakening response, mood states, and performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(5), 1340–1348.
- Díaz Gómez, M., Bocanegra Jaramillo, O., Teixeira, R., & Espindola, F. (2013). Salivary Surrogates of Plasma Nitrite and Catecholamines during a 21-Week Training Season in Swimmers. *PLoS ONE*, 8(5).
- Djurhuus, C. B., Gravholt, C. H., Nielsen, S., Mengel, A., Christiansen, J. S., Schmitz, O. E., ... Møller, N. (2002). Effects of cortisol on lipolysis and regional interstitial glycerol levels in humans, 172–177.
- Dreschler, A. J. (1998). *The Weightlifting Encyclopedia: A Guide to World Class Performance* (1st Edition). USA: A is A communications.
- Dubnov-Raz, G., Mashiach-Arazi, Y., Nouriel, A., Raz, R., & Constantini, N. W. (2015). Can height categories replace weight categories in striking martial arts competitions? A pilot study. *Journal of Human Kinetics*, 47(1), 91–98.

- Durnin, J., & Rahaman, M. (1967). The assessment of the amount of fat in the human body from measurements of skinfold thickness. *British Journal of Nutrition*, 21(3), 681–9.
- Edwards, A. V., & Jones, C. T. (1993). Autonomic control of adrenal function. *Journal of Anatomy*, 183, 291–307.
- El Ghoch, M., Soave, F., Calugi, S., & Dalle Grave, R. (2013). Eating disorders, physical fitness and sport performance: a systematic review. *Nutrients*, 5(12), 5140–60.
- Engert, V., Vogel, S., Efanov, S. I., Duchesne, A., Corbo, V., Ali, N., & Pruessner, J. C. (2011). Investigation into the cross-correlation of salivary cortisol and alpha-amylase responses to psychological stress. *Psychoneuroendocrinology*, 36(9), 1294–1302.
- Essén-Gustavsson, B., & Tesch, P. A. (1990). Glycogen and triglyceride utilization in relation to muscle metabolic characteristics in men performing heavy-resistance exercise. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 61, 5–10.
- Filaire, E., Alix, D., Ferrand, C., & Verger, M. (2009). Psychophysiological stress in tennis players during the first single match of a tournament. *Psychoneuroendocrinology*, 34(1), 150–7.
- Filaire, E., Duché, P., & Lac, G. (1998). Effects of amount of training on the saliva concentrations of cortisol, dehydroepiandrosterone and on the dehydroepiandrosterone: cortisol concentration ratio in women over 16 weeks of training. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 78(5), 466–471.
- Filaire, E., Ferreira, J., Oliveira, M., & Massart, A. (2013). Diurnal patterns of salivary alpha-amylase and cortisol secretion in female adolescent tennis players after 16 weeks of training. *Psychoneuroendocrinology*, 38, 1122–1132.
- Filaire, E., Lac, G., & Pequignot, J. (2003). Biological, hormonal, and psychological parameters in professional soccer players throughout a competitive season. *Perceptual and Motor Skills*, 97, 1061–1072.
- Filaire, E., Legrand, B., Lac, G., & Pequignot, J. (2004). Training of elite cyclists: effects on mood state and selected hormonal responses. *Journal of Sports Sciences*, 22, 1025–1033.
- Filaire, E., Maso, F., Degoutte, F., Jouanel, P., & Lac, G. (2001). Food restriction, performance, psychological state and lipid values in judo athletes. *International Journal of Sports Medicine*, 22(6), 454–9.
- Filaire, E., Maso, F., Sagnol, M., Ferrand, C., & Lac, G. (2001). Anxiety, hormonal responses and coping during judo competition Anxiety , Hormonal Responses , and Coping During a Judo Competition. *Aggressive Behavior*, 27, 55–63.
- Filaire, E., Massart, A., Hua, J., & Le Scanff, C. (2015). Dietary, eating behaviors, and diurnal patterns of salivary cortisol and alpha-amylase secretion among professional adolescent female tennis players. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 25(3), 233–242.

- Filaire, E., Rouveix, M., Pannafieux, C., & Ferrand, C. (2007). Eating attitudes, perfectionism and body-esteem of elite male judoists and cyclists. *Journal of Sports Science and Medicine*, 6, 50–57.
- Filaire, E., Sagnol, M., Ferrand, C., Maso, F., & Lac, G. (2001). Psychophysiological stress in judo athletes during competition. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 41, 263–268.
- Fillion, L., & Gagnon, P. (1999). French adaptation of the shortened version of the Profile of Mood States. *Psychological Reports*, 84(1), 188–90.
- Finn, K., Dolgener, F., & Williams, R. (2004). Effects of carbohydrate refeeding on physiological responses and psychological and physical performance following acute weight reduction in collegiate wrestlers. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18(2), 328–33.
- Fogelholm, G., Koskinen, R., Laakso, J., Rankinen, T., & Ruokonen, I. (1993). Gradual and rapid weight loss: effects on nutrition and performance in male athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 25(3), 371–7.
- Foster, C. (1998). Monitoring training in athletes with reference to overtraining syndrome. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 30(7), 1164–1168.
- Foster, C., Florhaug, J., Franklin, J., Gottschall, L., Hrovatin, L., Parker, S., ... Dodge, C. (2001). A New Approach to Monitoring Exercise Training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2001, 15(1), 109–115.
- Foster, G., Wadden, T., Peterson, F., Letizia, K., Barlett, S., & Conill, A. (1992). A Controlled Comparison of Three Very-low-calorie-diets: Effects on Weight, Body Composition and Symptoms. *American Journal of Clinical Nutrition*, 55, 811–817.
- Franchini, E., Brito, C. J., & Artioli, G. G. (2012). Weight loss in combat sports : physiological , psychological and performance effects. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 9, 52.
- Fries, E., Dettenborn, L., & Kirschbaum, C. (2009). The cortisol awakening response (CAR): Facts and future directions. *International Journal of Psychophysiology*, 72(1), 67–73.
- Fry, A., Kraemer, W., & Ramsey, L. (1998). Pituitary-adrenal-gonadal responses to high-intensity resistance exercise overtraining. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 85(6), 2352–2359.
- Fry, R., Grove, J., Morton, A., Zeroni, P. M., Gaudieri, S., & Keast, D. (1994). Psychological and immunological correlates of acute overtraining. *British Journal of Sports Medicine*, 28(4), 241–246.
- Gallagher, P., Leitch, M., Massey, A., McAllister-Williams, R., & Young, A. (2006). Assessing cortisol and dehydroepiandrosterone (DHEA) in saliva: effects of collection method. *Journal of Psychopharmacology*, 20(5), 643–9.

- Garhammer, J. (1993). A review of power output studies of olympic and powerlifting: methodology, performance prediction, and evaluation tests. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 7(2), 76–89.
- Garner, D., & Garfinkel, P. (1979). The Eating Attitudes Test: an index of the symptoms of anorexia nervosa. *Psychological Medicine*, 9, 273–279.
- Garthe, I., Raastad, T., Refsnes, P. E., Koivisto, A., & Sundgot-Borgen, J. (2011). Effect of two different weight-loss rates on body composition and strength and power-related performance in elite athletes. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 21(2), 97–104.
- Gatti, R., & De Palo, E. F. (2011). An update: Salivary hormones and physical exercise. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 21(2), 157–169.
- Ghiciuc, C. M., Cozma-Dima, C. L., Pasquali, V., Renzi, P., Simeoni, S., Lupusoru, C. E., & Patacchioli, F. R. (2011). Awakening responses and diurnal fluctuations of salivary cortisol, DHEA-S and alpha-amylase in healthy male subjects. *Neuroendocrinology Letters*, 32(4), 475–480.
- Glatthorn, J., Gouge, S., Nussbaumer, S., Impellizeri, F., & Maffiuletti, N. (2011). Validity and reliability of Optojump photoelectric cells for estimating vertical jump height. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(2), 556–60.
- Gold, P., & Chrousos, G. (2002). Organization of the stress system and its dysregulation in melancholic and atypical depression: high vs low CRH / NE states. *Molecular Psychiatry*, 7, 254–275.
- Gourgoulis, V., Aggeloussis, N., Garas, A., & Mavromatis, G. (2009). Unsuccessful vs. successful performance in snatch lifts: a kinematic approach. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(2), 486–494.
- Gröschl, M. (2008). Current Status of Salivary Hormone Analysis. *Clinical Chemistry*, 54(11), 1759–1769.
- Hall, C. J., & Lane, A. M. (2001). Effects of rapid weight loss on mood and performance among amateur boxers. *British Journal of Sports Medicine*, 35, 390–395.
- Harriss, D. J., & Atkinson, G. (2013). Ethical standards in sport and exercise science research: 2014 update. *International Journal of Sports Medicine*, 34(12), 1025–1028.
- Hawley, J. A., Gibala, M. J., & Berman, S. (2007). Innovations in athletic preparation: role of substrate availability to modify training adaptation and performance. *Journal of Sports Sciences*, 25 Suppl 1, S115–S124.
- Hawley, J. A., Tipton, K. D., & Millard-Stafford, M. L. (2006). Promoting training adaptations through nutritional interventions. *Journal of Sports Sciences*, 24, 709–721.
- Hellhammer, D. H., Wüst, S., & Kudielka, B. M. (2009). Salivary cortisol as a biomarker in stress research. *Psychoneuroendocrinology*, 34, 163–171.

- Helms, E., Zinn, C., Rowlands, D., & Brown, S. (2014). A Systematic Review of Dietary Protein During Caloric Restriction in Resistance Trained Lean Athletes : A Case for Higher Intakes. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 24, 127–138.
- Helms, E., Zinn, C., Rowlands, D., Naidoo, R., & Cronin, J. (2015). High-Protein, Low-Fat, Short-Term Diet Results in Less Stress and Fatigue Than Moderate-Protein Moderate-Fat Diet During Weight Loss in Male Weightlifters: A Pilot Study. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 25(2), 163–70.
- Hopkins, W. (2006). Sample sizes for magnitude-based inferences about clinical, practical or mechanistic significance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 38, S528–S529.
- Horswill, C., Hickner, R., Scott, J., Costill, D., & Gould, D. (1990). Weight loss, dietary carbohydrate modifications, and high intensity, physical performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 22(4), 470–6.
- Hua, J., Le Scanff, C., Larue, J., José, F., Martin, J. C., Devillers, L., & Filaire, E. (2014). Global stress response during a social stress test: Impact of alexithymia and its subfactors. *Psychoneuroendocrinology*, 50, 53–61.
- Huber, T., Issa, K., Schik, G., & Wolf, O. (2006). The cortisol awakening response is blunted in psychotherapy inpatients suffering from depression. *Psychoneuroendocrinology*, 31(7), 900–903.
- International Judo Federation. (2013). Sports and Organization Rules of the International Judo Federation Edition July 2010 Sports and Organization Rules, 12.
- Ivy, J. (1991). Muscle glycogen synthesis before and after exercise. *Sports Medicine*, 11(1), 6–19.
- Jakubowicz, D., Beer, N., Beer, R., & Nestler, J. (1995). Disparate effects of weight reduction by diet on serum dehydroepiandrosterone-sulfate levels in obese men and women. *Journal of Clinical Endocrinology And Metabolism*, 80(11), 3373–3376.
- Jlid, M., Maffuli, N., Elloumi, M., Moalla, W., & Paillard, T. (2013). Rapid weight loss alters muscular performance and perceived exertion as well as postural control in elite wrestlers. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 53, 620–7.
- Johnstone, A. M., Faber, P., Andrew, R., Gibney, E. R., Elia, M., Lobley, G., ... Walker, B. R. (2004). Influence of short-term dietary weight loss on cortisol secretion and metabolism in obese men. *European Journal of Endocrinology*, 150(2), 185–194.
- Judelson, D., Maresh, C., Farrell, M., Yamamoto, L., Armstrong, L., Kraemer, W., ... Anderson, J. (2007). Effect of hydration state on strength, power, and resistance exercise performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(10), 1817–24.

- Judelson, D., Maresh, C., Yamamoto, L., Farrell, M., Armstrong, L., Kraemer, W., ... Anderson, J. (2008). Effect of hydration state on resistance exercise-induced endocrine markers of anabolism, catabolism, and metabolism. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 105(3), 816–24.
- Kamandulis, S., Snieckus, A., Venckunas, T., Aagaard, P., Masiulis, N., & Skurvydas, A. (2012). Rapid increase in training load affects markers of skeletal muscle damage and mechanical performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(11), 2953–2961.
- Kellmann, M. (2010). Preventing overtraining in athletes in high-intensity sports and stress/recovery monitoring. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 20, 95–102.
- Kellmann, M., & Kallus, K. (2001). *Recovery-Stress Questionnaire for athletes*. (M. Kellmann & K. Kallus, Eds.) (Human Kine). Champaign, IL.
- Kivlighan, K. T., & Granger, D. A. (2006). Salivary α -amylase response to competition: Relation to gender, previous experience, and attitudes. *Psychoneuroendocrinology*, 31, 703–714.
- Koral, J., & Dosseville, F. (2009). Combination of gradual and rapid weight loss: effects on physical performance and psychological state of elite judo athletes. *Journal of Sports Sciences*, 27(2), 115–120.
- Kraemer, W. J., & Ratamess, N. A. (2005). Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 35(4), 339–61.
- Kunz-Ebrecht, S., Kirschbaum, C., Marmot, M., & Steptoe, A. (2004). Differences in cortisol awakening response on work days and weekends in women and men from the Whitehall II cohort. *Psychoneuroendocrinology*, 29(4), 516–528.
- Lac, G., Lac, N., & Robert, A. (1993). Steroid assays in saliva: A method to detect plasmatic contaminations. *Archives Internationales de Physiologie, de Biochimie et de Biophysique*, 101(5), 257–262.
- Laurent, H., Powers, S., & Granger, D. (2013). Refining the multisystem view of the stress response: Coordination among cortisol, alpha-amylase, and subjective stress in response to relationship conflict. *Physiology & Behavior*, 119, 52–60.
- Le Panse, B., Labsy, Z., Baillot, A., Vibarel-Rebot, N., Parage, G., Albrings, D., ... Collomp, K. (2012). Changes in steroid hormones during an international powerlifting competition. *Steroids*, 77(13), 1339–1344.
- Le Panse, B., Vibarel-Rebot, N., Parage, G., Albrings, D., Amiot, V., De Ceaurriz, J., & Collomp, K. (2010). Cortisol, DHEA, and testosterone concentrations in saliva in response to an international powerlifting competition. *Stress (Amsterdam, Netherlands)*, 13(6), 528–32.

- Leichner, P., Steiger, H., Puentes-Neuman, G., Perreault, M., & Gottheil, N. (1994). Validation d'une échelle d'attitudes alimentaires auprès d'une population québécoise francophone. *Revue Canadienne de Psychologie*, 39, 49–54.
- Loria-Kohen, V., Gómez-Candela, C., Palma-Milla, S., Amador-Sastre, B., Hernanz, A., & Bermejo, L. M. (2013). A pilot study of folic acid supplementation for improving homocysteine levels, cognitive and depressive status in eating disorders. *Nutrición Hospitalaria*, 28(3), 807–15.
- Mäestu, J., Eliakim, A., Jürimäe, J., Valter, I., & Jürimäe, T. (2010). Anabolic and catabolic hormones and energy balance of the male bodybuilders during the preparation for the competition. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(4), 1074–1081.
- Maninger, N., Wolkowitz, O. M., Reus, V. I., Epel, E. S., & Mellon, S. H. (2009). Neurobiological and Neuropsychiatric Effects of Dehydroepiandrosterone (DHEA) and DHEA Sulfate (DHEAS) Nicole. *Frontiers in Neuroendocrinology*, 30(1), 65–91.
- Markovic, G., Dizdr, D., Jukic, I., & Cardinale, M. (2004). Reliability and factorial validity of squat and countermovement jump tests. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18(3), 551–555.
- Martin, A. (2001). *Apports nutritionnels conseillés pour la population française*. (A. Martin, Ed.) (CNERMA-CNR).
- Martinent, G., Decret, J., Isoard-Gautheur, S., Filaire, E., & Ferrand, C. (2014). Evaluations of the psychometric properties of the Recovery-Stress Questionnaire for Athletes among a sample of young French table tennis players. *Psychological Reports*, 114, 326–40.
- Martinen, R. H., Judelson, D., Wiersma, L. D., & Coburn, J. W. (2011). Effects of self-selected mass loss on performance and mood in collegiate wrestlers. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(4), 1010–1015.
- Matsuda, S., Yamaguchi, T., Okada, K., Gotouda, A., & Mikami, S. (2012). Day-to-day variations in salivary cortisol measurements. *Journal of Prosthodontic Research*, 56, 37–41.
- Mc Nair, D., & Lorr, M. (1971). *Manual for the Profile of Mood States*. (D. Mc Nair & M. Lorr, Eds.) (Educationa). San Diego, CA.
- McEwen, B. S. (1998). Protective and damaging effects of stress mediators. *The New England Journal of Medicine*, 338(3), 171–179.
- Mendes, S. H., Tritto, A. C., Guilherme, J. P. L. F., Solis, M. Y., Vieira, D. E., Franchini, E., ... 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.
- Mero, A., Huovinen, H., Matintupa, O., Hulmi, J., Puurtinen, R., Hohtari, H., & Karila, T. (2010). Moderate energy restriction with high protein diet results in healthier outcome in women. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 7(1), 4.

- Mettler, S., Mitchell, N., & Tipton, K. D. (2010). Increased protein intake reduces lean body mass loss during weight loss in athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(2), 326–337.
- Millet, P., Guillard, J. C., Fuchs, F., & Klepping, J. (1989). Nutrient intake and vitamin status of healthy French vegetarians and nonvegetarians. *American Journal of Clinical Nutrition*, 50, 718–27.
- Monteleone, P., Scognamiglio, P., Monteleone, A. M., Mastromo, D., Steardo, L., Serino, I., & Maj, M. (2011). Abnormal diurnal patterns of salivary α -amylase and cortisol secretion in acute patients with anorexia nervosa. *World Journal of Biological Psychiatry*, 12(May), 455–461.
- Mora-rodriguez, R., Hodgkinson, B., Byerley, L., & Coyle, E. (2001). Effects of B-adrenergic receptor stimulation and blockade on substrate metabolism during submaximal exercise. *American Journal of Physiology. Endocrinology and Metabolism*, 280, 752–760.
- Moreira, A., Freitas, C., Nakamura, F., Drago, G., Drago, M., & Aoki, M. (2013). Effect of match importance on salivary cortisol and immunoglobulin A responses in elite young volleyball players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(1), 202–207.
- Morgan, W., Brown, D., Raglin, J., O’connor, P., & Ellickson, K. (1987). Psychological monitoring of overtraining and staleness. *British Journal of Sports Medicine*, 21(3), 107–114.
- Morgan, W., Costill, D., Flynn, M., Raglin, J., & O’Connor, P. (1988). Mood disturbance following increased training in swimmers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 20(4), 408–14.
- Morton, R. W., McGlory, C., & Phillips, S. M. (2015). Nutritional interventions to augment resistance training-induced skeletal muscle hypertrophy. *Frontiers in Physiology*, 6(SEP), 1–9.
- Nater, U., Bohus, M., Abbruzzese, E., Ditzen, B., Gaab, J., Kleindienst, N., ... Ehlert, U. (2010). Increased psychological and attenuated cortisol and alpha-amylase responses to acute psychosocial stress in female patients with borderline personality disorder. *Psychoneuroendocrinology*, 35, 1565–1572.
- Nater, U., & Rohleder, N. (2009). Salivary alpha-amylase as a non-invasive biomarker for the sympathetic nervous system: Current state of research. *Psychoneuroendocrinology*, 34(4), 486–496.
- Nater, U., Rohleder, N., Schlotz, W., Ehlert, U., & Kirschbaum, C. (2007). Determinants of the diurnal course of salivary alpha-amylase. *Psychoneuroendocrinology*, 32(4), 392–401.
- Nieuwenhuizen, A. G., & Rutters, F. (2008). The hypothalamic-pituitary-adrenal-axis in the regulation of energy balance. *Physiology & Behavior*, 94(2), 169–177.

- Oskis, A., Clow, A., Thorn, L., Loveday, C., & Hucklebridge, F. (2012). Differences between diurnal patterns of salivary cortisol and dehydroepiandrosterone in healthy female adolescents. *Stress (Amsterdam, Netherlands)*, 15(1), 110–4.
- Oskis, A., Loveday, C., Hucklebridge, F., Thorn, L., & Clow, A. (2012). Diurnal patterns of salivary cortisol and DHEA in adolescent anorexia nervosa. *Stress*, 15(6), 601–607.
- Oskis, A., Loveday, C., Hucklebridge, F., Wood, D., & Clow, A. (2012). Recovery from adolescent anorexia nervosa and associations with diurnal patterns of salivary stress hormones: a case report. *Case Reports in Psychiatry*, 2012, 798512.
- Ozkan, I., & Ibrahim, C. (2016). Dehydration, skeletal muscle damage and inflammation before the competitions among the elite wrestlers. *The Journal of Physical Therapy Science*, 28, 162–168.
- Paillard, T. (2006). Stratégie optimale d’amaigrissement dans les sports à catégories de poids. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 31(6), 684–692.
- Paoli, A., Grimaldi, K., D’Agostino, D., Cenci, L., Moro, T., Bianco, A., & Palma, A. (2012). Ketogenic diet does not affect strength performance in elite artistic gymnasts. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 9(1), 34.
- Papacosta, E., & Nassis, G. P. (2011). Saliva as a tool for monitoring steroid, peptide and immune markers in sport and exercise science. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 14(5), 424–434.
- Pasiakos, S. M., Caruso, C. M., Kellogg, M. D., Kramer, F. M., & Lieberman, H. R. (2011). Appetite and endocrine regulators of energy balance after 2 days of energy restriction: insulin, leptin, ghrelin, and DHEA-S. *Obesity (Silver Spring)*, 19(6), 1124–1130.
- Passelergue, P., & Lac, G. (1999). Saliva Cortisol, Testosterone and T/C Ratio Variations During a Wrestling Competition and During the Post-Competitive Recovery Period. *International Journal of Sports Medicine*, 20, 109–113.
- Passelergue, P., Robert, A., & Lac, G. (1995). Salivary Cortisol and Testosterone Variations during. *International Journal of Sports Medicine*, 16(5), 298–303.
- Perogamvros, I., Ray, D. W., & Trainer, P. J. (2012). Regulation of cortisol bioavailability - Effects on hormone measurement and action. *Nature Reviews Endocrinology*, 8(12), 717–727.
- Petrakova, L., Doering, B. K., Vits, S., Engler, H., Rief, W., Schedlowski, M., & Grigoleit, J. S. (2015). Psychosocial stress increases salivary alpha-Amylase activity independently from plasma noradrenaline levels. *PLoS ONE*, 10(8), 1–9.
- Pettersson, S., & Berg, C. (2014). Hydration status in elite wrestlers, judokas, boxers, and taekwondo athletes on competition day. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 24(3), 267–75.

- Pettersson, S., Ekström, M., & Berg, C. (2012). The food and weight combat. A problematic fight for the elite combat sports athlete. *Appetite*, 59(2), 234–42.
- Pettersson, S., Ekström, M., & Berg, C. (2013). Practices of weight regulation among elite athletes in combat sports: a matter of mental advantage? *Journal of Athletic Training*, 48(1), 99–108.
- Phillips, S. M. (2014). A Brief Review of Higher Dietary Protein Diets in Weight Loss: A Focus on Athletes. *Sports Medicine*, 44(S2), 149–153.
- Phillips, S. M., & Van Loon, L. J. C. (2011). Dietary protein for athletes: From requirements to optimum adaptation. *Journal of Sports Sciences*, 29, S29–S38.
- Pilis, K., Michalski, C., Zych, M., Pilis, A., Jelonek, J., & Kaczmarzyk, A. (2014). A nutritional evaluation of dietary behaviour in various professional sports. *Rocz Panstw Zakl Hig*, 65(3), 227–234.
- Pluchino, N., Drakopoulos, P., Wenger, J. M., Petignat, P., & Genazzani, A. R. (2015). Neurobiology of DHEA and effects on sexuality, mood and cognition. *Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, 145, 273–280.
- Pruessner, J., Hellhammer, D., & Kirschbaum, C. (1999). Burnout, perceived stress, and cortisol responses to awakening. *Psychosomatic Medicine*, 61, 197–204.
- Pruessner, J., Kirschbaum, C., Meinlschmid, G., & Hellhammer, D. (2003). Two formulas for computation of the area under the curve represent measures of total hormone concentration versus time-dependent change. *Psychoneuroendocrinology*, 28, 916–931.
- Pruessner, J., Wolf, O., Hellhammer, D., Buske-Kirschbaum, A., Von Auer, K., Jobst, S., ... Kirschbaum, C. (1997). Free cortisol levels after awakening: A reliable biological marker for the assessment of adrenocortical activity. *Life Sciences*, 61(26), 2539–2549.
- Pulkkinen, W. (2001). *The sport science of elite judo athletes: review and application for training*. (W. Pulkkinen, Ed.) (Pulkinetic). Guelph, ON.
- Purge, P., Jürimäe, J., & Jürimäe, T. (2006). Hormonal and psychological adaptation in elite male rowers during prolonged training. *Journal of Sports Sciences*, 24(10), 1075–1082. <http://doi.org/10.1080/02640410500432516>
- Rabasa, C., & Dickson, S. L. (2016). Impact of stress on metabolism and energy balance. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 9, 71–77.
- Rankin, J., Ocel, J., & Craft, L. (1996). Effect of weight loss and refeeding diet composition on anaerobic performance in wrestlers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 28(10), 1292–9.
- Ratamess, N., Kraemer, W., Volek, J., Rubin, M., Gomez, A., French, D., ... Dioguardi, F. (2003). The Effects of Amino Acid Supplementation on Muscular Performance During Resistance Training Overreaching. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 17(2), 250–258.

- Reljic, D., Hässler, E., Jost, J., & Friedmann-Bette, B. (2013). Rapid weight loss and the body fluid balance and hemoglobin mass of elite amateur boxers. *Journal of Athletic Training*, 48(1), 109–17.
- Reljic, D., Jost, J., Dickau, K., Kinscherf, R., Bonaterra, G., & Friedmann-Bette, B. (2015). Effects of pre-competition rapid weight loss on nutrition, vitamin status and oxidative stress in elite boxers. *Journal of Sports Sciences*, 33(5), 435–448.
- Robinson, S. L., Lambeth-Mansell, A., Gillibrand, G., Smith-Ryan, A., & Bannock, L. (2015). A nutrition and conditioning intervention for natural bodybuilding contest preparation : case study. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 12, 20.
- Roemmich, J. N., & Sinning, W. E. (1997a). Weight loss and wrestling training : effects on growth-related hormones. *Journal of Applied Physiology*, 82(6), 1760–1764.
- Roemmich, J. N., & Sinning, W. E. (1997b). Weight loss and wrestling training : effects on nutrition, growth, maturation , body composition, and strength. *Journal of Applied Physiology*, 82(6), 1751–1759.
- Rohleder, N., Beulen, S., Chen, E., Wolf, J., & Kirschbaum, C. (2007). Stress on the dance floor: the cortisol stress response to social-evaluative threat in competitive ballroom dancers. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 33(1), 69–84.
- Rohleder, N., & Nater, U. (2009). Determinants of salivary alpha-amylase in humans and methodological considerations. *Psychoneuroendocrinology*, 34, 469–485.
- Roth-Maier, D. A., Kettler, S. I., & Kirchgessner, M. (2002). Availability of vitamin B6 from different food sources. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 53(2), 171–179.
- Sapolsky, R. M., Romero, L. M., & Munck, A. U. (2000). How do glucocorticoids influence stress responses? Integrating permissive, suppressive, stimulatory, and preparative actions. *Endocrine Reviews*, 21(1), 55–89.
- Sawka, M. N., Burke, L. M., Eichner, E. R., Maughan, R. J., Montain, S. J., & Stachenfeld, N. S. (2007). Exercise and fluid replacement. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(2), 377–390.
- Sawyer, J., Wood, R., Davidson, P., Collins, S., Matthews, T., Gregory, S., & Paolone, V. (2013). Effects of a short-term carbohydrate-restricted diet on strength and power performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(8), 2255–62.
- Scavo, D., Barletta, C., Buzzetti, R., & Vagiri, D. (1988). Effects of caloric restriction and exercise on B-Endorphin, ACTH and cortisol circulating levels in obesity. *Physiology & Behavior*, 42(1), 65–68.
- Schaal, K., Tiollier, E., Le Meur, Y., Casazza, G., & Hausswirth, C. (2016). Elite synchronized swimmers display decreased energy availability during intensified training. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, (July) [Epub ahead of print].

- Schommer, N. C., Hellhammer, D. H., & Kirschbaum, C. (2003). Dissociation between reactivity of the hypothalamus-pituitary-adrenal axis and the sympathetic-adrenal-medullary system to repeated psychosocial stress. *Psychosomatic Medicine*, 65(3), 450–460.
- Schulz, P., Kirschbaum, C., Pruessner, J., & Hellhammer, D. (1998). Increased free cortisol secretion after awakening in chronically stressed individuals due to work overload. *Stress Medicine*, 14(2), 91–97.
- Schumacher, S., Kirschbaum, C., Fydrich, T., & Ströhle, A. (2013). Is salivary alpha-amylase an indicator of autonomic nervous system dysregulations in mental disorders?— A review of preliminary findings and the interactions with cortisol. *Psychoneuroendocrinology*, 38, 729–743.
- Selhub, J., Bagley, L., Miller, J., & Rosenberg, I. (2000). B vitamins, homocysteine, and neurocognitive function in the elderly. *American Journal of Clinical Nutrition*, 71(2), 614S–620S.
- Sharp, C., & Pearson, D. (2010). Amino acid supplements and recovery from high-intensity resistance training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(4), 1125–1130.
- Slater, G., & Phillips, S. M. (2011). Nutrition guidelines for strength sports: Sprinting, weightlifting, throwing events, and bodybuilding. *Journal of Sports Sciences*, 29(sup1), S67–S77.
- Sluiter, J. K., Frings-Dresen, M. H., Meijman, T. F., & van der Beek, A. J. (2000). Reactivity and recovery from different types of work measured by catecholamines and cortisol: a systematic literature overview. *Occupational and Environmental Medicine*, 57(5), 298–315.
- Smyth, N., Hucklebridge, F., Thorn, L., Evans, P., & Clow, A. (2013). Salivary cortisol as a biomarker in social science research. *Social and Personality Psychology Compass*, 7(9), 605–625.
- Spiegel, D., Giese-Davis, J., Barr Taylor, C., & Kraemer, H. (2006). Stress sensitivity in metastatic breast cancer: analysis of hypothalamic-pituitary-adrenal axis function. *Psychoneuroendocrinology*, 31(10)(10), 1231–1244.
- Steen, S., & Brownell, K. (1990). Patterns of weight loss and regain in wrestlers: has the tradition changed? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 22(6), 762–768.
- Storey, A., & Smith, H. K. (2012). Unique aspects of competitive weightlifting: performance, training and physiology. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 42(9), 769–90.
- Sundgot-Borgen, J., & Garthe, I. (2011). Elite athletes in aesthetic and Olympic weight-class sports and the challenge of body weight and body compositions. *Journal of Sports Sciences*, 29 Suppl 1, S101-14.

- Su-Vi-Max. (1994). *Portions alimentaires. Manuel photos pour l'estimation des quantités*. (Su-Vi-Max, Ed.) (Editions P). Paris.
- Takai, N., Yamaguchi, M., Aragaki, T., Eto, K., Uchihashi, K., & Nishikawa, Y. (2004). Effect of psychological stress on the salivary cortisol and amylase levels in healthy young adults. *Archives of Oral Biology*, 49(12), 963–968.
- Tam, C. S., Frost, E. A., Xie, W., Rood, J., Ravussin, E., & Redman, L. M. (2014). No effect of caloric restriction on salivary cortisol levels in overweight men and women. *Metabolism*, 63(2), 194–198.
- Timpmann, S., Burk, A., Medijainen, L., Tamm, M., Kreegipuu, K., Vähi, M., ... Ööpik, V. (2012). Dietary sodium citrate supplementation enhances rehydration and recovery from rapid body mass loss in trained wrestlers. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism = Physiologie Appliquée, Nutrition et Métabolisme*, 37(6), 1028–37.
- Tomiya, A. J., Mann, T., Vinas, D., Hunger, J. M., DeJager, J., & Taylor, S. E. (2010). Low Calorie Dieting Increases Cortisol. *Psychosomatic Medicine*, 72(4), 357–364.
- Too, D., Wakayama, E., Locati, L., & Landwer, G. (1998). Effect of a precompetition bodybuilding diet and training regimen on body composition and blood chemistry. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 38(3), 245–52.
- Trexler, E. T., Smith-Ryan, A. E., & Norton, L. E. (2014). Metabolic adaptation to weight loss: implications for the athlete. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 11(1), 7.
- Turocy, P. S., DePalma, B. F., Horswill, C. A., Laquale, K. M., Martin, T. J., Perry, A. C., ... Utter, A. C. (2011). National athletic trainers' association position statement: Safe weight loss and maintenance practices in sport and exercise. *Journal of Athletic Training*, 46(3), 322–336.
- Van Voorhees, E. E., Dennis, M. F., Calhoun, P. S., & Beckham, J. C. (2014). Association of DHEA, DHEAS, and cortisol with childhood trauma exposure and posttraumatic stress disorder. *International Clinical Psychopharmacology*, 29(1), 56–62.
- Vidailhet, M. (2004). *Apports nutritionnels conseillés pour enfants et adolescents sportifs de haut niveau de performance*. (M. Vidailhet, Ed.) (Editions L). Paris.
- Viitasalo, J., Kyröläinen, H., Bosco, C., & Alen, M. (1987). Effects of rapid weight reduction on force production and vertical jumping height. *International Journal of Sports Medicine*, 8(4), 281–5.
- Vingren, J. L., Kraemer, W. J., Ratamess, N. A., Anderson, J. M., Volek, J. S., & Maresh, C. M. (2010). Testosterone Physiology in Resistance Exercise and Training. *Sports Medicine*, 40(12), 1037–1053.
- Vining, R. F., McGinley, R. A., & Symons, R. G. (1983). Hormones in saliva: Mode of entry and consequent implications for clinical interpretation. *Clinical Chemistry*, 29(10), 1752–1756.

- Viru, A., & Viru, M. (2004). Cortisol - Essential Adaptation Hormone in Exercise. *International Journal of Sports Medicine*, 25, 461–464.
- Walberg, J. L., Leidy, M. K., Sturgill, D. J., Hinkle, D. E., Ritchey, S. J., & Sebolt, D. R. (1988). Macronutrient content of a hypoenergy diet affects nitrogen retention and muscle function in weight lifters. *International Journal of Sports Medicine*, 9(4), 261–266.
- Weber, B., Lewicka, S., Deuschle, M., Colla, M., Vecsei, P., & Heuser, I. (2000). Increased Diurnal Plasma Concentrations of Cortisone in Depressed Patients. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 85, 1133–1136.
- Wilborn, C. D., & Willoughby, D. S. (2004). The role of dietary protein intake and resistance training on Myosin heavy chain expression. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 1(2), 27–34.
- Wilcox, R. R., Granger, D. A., Szanton, S., & Clark, F. (2014). Diurnal patterns and associations among salivary cortisol, DHEA and alpha-amylase in older adults. *Physiology and Behavior*, 129, 11–16.
- Williams, G., Bing, C., Cai, X. J., Harrold, J. A., King, P. J., & Liu, X. H. (2001). The hypothalamus and the control of energy homeostasis Different circuits, different purposes, 74, 683–701.
- Wilson, G., Chester, N., Eubank, M., Crighton, B., Drust, B., Morton, J., & Close, G. (2012). An alternative dietary strategy to make weight while improving mood, decreasing body fat, and not dehydrating: a case study of a professional jockey. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 22(3), 225–31.
- Wilson, G., Drust, B., Morton, J., & Close, G. (2014). Weight-making strategies in professional jockeys: implications for physical and mental health and well-being. *Sports Medicine*, 44(6), 785–96.
- Woolf, K., & Manore, M. (2006). B-vitamins and exercise: does exercise alter requirements? *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 16(5), 453–84.
- Wüst, S., Federenko, I., Hellhammer, D. H., & Kirschbaum, C. (2000). Genetic factors, perceived chronic stress, and the free cortisol response to awakening. *Psychoneuroendocrinology*, 25(7), 707–720.
- Yehuda, R., Resnick, H., Kahana, B., & Giller, E. (1993). Long-lasting hormonal alterations to extreme stress in humans : Normative or maladaptive? *Psychosomatic Medicine*, 55, 287–297.
- Yoon, A. S., & Weierich, M. (2016). Salivary Biomarkers of Neural Hypervigilance in Trauma-Exposed Women. *Psychoneuroendocrinology*, 63, 17–25.
- Zakowski, J., & Bruns, D. (1985). Biochemistry of human alpha amylase isoenzymes. *Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences*, 21(4), 283–322.

- Zarit, S. H., Whetzel, C. A., Kim, K., Femia, E. E., Almeida, D. M., Rovine, M. J., & Cousino Klein, L. (2014). Daily stressors and adult day service use by family caregivers: Effects on depressive symptoms, positive mood and DHEA-S. *American Journal of Geriatric Psychiatry*, 22(12), 1592–1602.
- Zatsiorsky, V., & Kraemer, W. (2006). *Science and practice of strength training*. (H. Kinetics, Ed.) (2nd Editio). Champaign, IL.
- Zilioli, S., & Watson, N. V. (2013). Winning Isn't Everything : Mood and Testosterone Regulate the Cortisol Response in Competition. *PLoS ONE*, 8(1), e52582.
- Zouhal, H., Lemoine-Morel, S., Mathieu, M., Casazza, G., & Jabbour, G. (2013). Catecholamines and Obesity : Effects of Exercise and Training. *Sports Medicine*, 43, 591–600.

TABLES DES MATIERES

LISTE DES PUBLICATIONS	8
-------------------------------	----------

LISTE DES COMMUNICATIONS	9
---------------------------------	----------

INDEX DES FIGURES	10
--------------------------	-----------

✓ Manuscrit	10
✓ Article 1	10
✓ Article 2	10
✓ Article 3	11

INDEX DES TABLEAUX	12
---------------------------	-----------

✓ Manuscrit	12
✓ Article 1	12
✓ Article 2	13
✓ Article 3	13

INDEX DES EQUATIONS	14
----------------------------	-----------

CADRE THEORIQUE	17
------------------------	-----------

I. LA PERTE DE POIDS CHEZ LE SPORTIF	21
---	-----------

I.1. UNE PRATIQUE COURANTE CHEZ LE SPORTIF	21
---	-----------

A) LES CARACTERISTIQUES DE LA PERTE DE POIDS	21
--	----

B) LES RAISONS DE CES PRATIQUES	26
---------------------------------	----

I.2. LES DIFFERENTES METHODES DE PERTE DE POIDS	27
--	-----------

I.3. LES SOLUTIONS ENVISAGEES POUR LUTTER CONTRE CES PRATIQUES	28
---	-----------

II. INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE SUR LES SYSTEMES PHYSIOLOGIQUES DE REPONSE AU STRESS	30
---	-----------

II.1. LES SYSTEMES PHYSIOLOGIQUES DE REPONSE AU STRESS	30
---	-----------

A) LE SYSTEME SYMPATHO-ADRENO-MEDULLAIRE (SAM)	30
--	----

B) L'AXE HYPOTHALAMO-HYPOPHYSO-SURRENALIEN (HHS)	32
--	----

✓ Le cortisol	32
---------------	----

✓ La déhydroépiandrosterone (DHEA)	36
c) COMMENT EVALUER L'ACTIVITE DE CES SYSTEMES PHYSIOLOGIQUES ?	38
✓ Les prélèvements salivaires	38
✓ Quels sont les indicateurs salivaires ?	40
✓ Comment calculer les réponses physiologiques ?	42
✓ Quel mode de prélèvement ?	44
✓ Les consignes à respecter	45
II.2. REPONSES DES SYSTEMES PHYSIOLOGIQUES DU STRESS	46
A) LA REPONSE AU STRESS, UNE COORDINATION DES 2 AXES	46
B) DYSFONCTIONNEMENT DES SYSTEMES PHYSIOLOGIQUES EN REPONSE AU STRESS	48
✓ La réponse du cortisol au stress chronique	48
✓ La réponse de la DHEA au stress chronique	50
✓ La réponse de l'α-amylase salivaire au stress chronique	52
✓ La dissociation des systèmes physiologiques du stress	53
C) INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE SUR L'ACTIVITE DES SYSTEMES PHYSIOLOGIQUES DU STRESS	54
✓ Influence sur l'activité des systèmes physiologiques du stress	54
✓ Influence sur les réponses physiologiques au stress de l'exercice	57
✓ Une adaptation chronique à la restriction alimentaire	58
III. INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE SUR LES PARAMETRES PSYCHOLOGIQUES	59
III.1. LES PARAMETRES PSYCHOLOGIQUES ET PERFORMANCE SPORTIVE	59
A) L'HUMEUR	59
B) LA BALANCE STRESS/RECUPERATION	61
III.2. INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE	62
III.3. LA PERTE DE POIDS, UN AVANTAGE PSYCHOLOGIQUE ?	65
IV. INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE SUR LA PERFORMANCE	67
IV.1. APPORTS NUTRITIONNELS, ADAPTATIONS A L'ENTRAINEMENT ET PERFORMANCES	67
IV.2. QUELS TYPES DE PERFORMANCE ET QUELLES CONSEQUENCES ?	67
V. CARACTERISTIQUES ET CONTRAINTES DE L'HALTEROPHILIE	77
V.1. L'HALTEROPHILIE, DISCIPLINE OLYMPIQUE	77
V.2. FACTEURS DE LA PERFORMANCE EN HALTEROPHILIE	78
V.3. RESTRICTION ALIMENTAIRE ET PERTE DE POIDS EN HALTEROPHILIE	79

VI. PROBLEMATIQUES ET HYPOTHESES	80
VI.1. PROBLEMATIQUES	80
VI.2. HYPOTHESES	80
VII. LE PROTOCOLE EXPERIMENTAL	82
VII.1. SUJETS	82
VII.2. DESCRIPTION DU PROTOCOLE	83
VII.3. LES PARAMETRES ANTHROPOMETRIQUES	88
VII.4. LE COMPORTEMENT ALIMENTAIRE	88
A) EVALUATION DES TROUBLES DU COMPORTEMENT ALIMENTAIRE	88
B) LA QUANTIFICATION DES APPORTS NUTRITIONNELS	89
VII.5. LA CHARGE D'ENTRAINEMENT	91
VII.6. LES INDICATEURS PHYSIOLOGIQUES	92
A) LES PRELEVEMENTS URINAIRES	92
B) LES PRELEVEMENTS DE SANG CAPILLAIRE	93
C) LES PRELEVEMENTS SALIVAIRES	94
✓ Les réponses au réveil	94
✓ Les réponses à l'exercice	96
VII.7. LES PARAMETRES PSYCHOLOGIQUES	96
VII.8. LA PERFORMANCE	96
A) LA COMPETITION SIMULEE D'HALTEROPHILIE	97
B) LE TEST DE DETENTE VERTICALE (CMJ)	98
VII.9. ANALYSES STATISTIQUES	99
A) LE CALCUL DES REPONSES AU REVEIL	99
B) LE CALCUL DES REPONSES A L'EXERCICE	100
VIII. ARTICLE 1 : INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE SUR LA PERFORMANCE ET LES PARAMETRES PSYCHOLOGIQUES CHEZ DES HALTEROPHILES DE HAUT NIVEAU	101
IX. ARTICLE 2 : INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE SUR LES SYSTEMES PHYSIOLOGIQUES DE REPONSE AU STRESS	125
X. ARTICLE 3 : INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE SUR LES REPONSES PHYSIOLOGIQUES A UNE COMPETITION SIMULEE	153
XI. DISCUSSION GENERALE	173
XI.1. INFLUENCE SUR LE NIVEAU DE PERFORMANCE	173
A) MAINTIEN DE LA PERFORMANCE ABSOLUE CHEZ LE GROUPE RESTRICTION	173
B) AMELIORATION DE LA PERFORMANCE RELATIVE CHEZ LE GROUPE RESTRICTION	176

C) AMELIORATION DE LA PERFORMANCE ABSOLUE POUR LE GROUPE CONTROLE	177
XI.2. INFLUENCE SUR LES PARAMETRES PSYCHOLOGIQUES	178
A) DES RESULTATS DIFFERENTS SELON LE QUESTIONNAIRE UTILISE	178
B) LES APPORTS EN VITAMINES ET LES PARAMETRES PSYCHOLOGIQUES	180
XI.3. INFLUENCE DE LA RESTRICTION ALIMENTAIRE SUR L'ACTIVITE DES SYSTEMES PHYSIOLOGIQUES DU STRESS	181
A) LES REPONSES AU REVEIL	181
B) LES REPONSES A L'EXERCICE	189
 XII. LIMITES ET PERSPECTIVES	 191
XII.1. LIMITES DE L'ETUDE	191
XII.2. CONCLUSION GENERALE	192
XII.3. PERSPECTIVES	193
 BIBLIOGRAPHIE	 195
 TABLES DES MATIERES	 213

Titre : Influence d'une période de restriction alimentaire sur les marqueurs salivaires du stress, les paramètres psychologiques et la performance chez des haltérophiles de haut niveau

Mots clés : Perte de poids, stress, cortisol salivaire, α -amylase salivaire, humeur, haltérophilie

Résumé : La restriction des apports alimentaires est une méthode couramment utilisée pour perdre du poids dans les sports à catégories de poids. La réduction des apports caloriques se traduit par une activation des systèmes physiologiques du stress, au niveau central et périphérique, visant à préserver l'homéostasie énergétique. Néanmoins, l'influence sur les paramètres physiologiques, psychologiques et physiques reste controversée et ne permet pas de définir clairement un impact négatif de la restriction alimentaire sur la santé et le niveau de performance. L'objectif de ce travail était d'évaluer l'influence d'une restriction alimentaire sur les indicateurs psychophysiologiques du stress, ainsi que le niveau de performance chez des haltérophiles de haut niveau.

Nos résultats ont montré que la restriction alimentaire ne modifiait pas le niveau de performance en haltérophilie, mais induisait une altération des paramètres psychologiques. La période de restriction alimentaire se traduisait par une dissociation de l'activité des systèmes physiologiques du stress, ainsi qu'une modification des réponses hormonales à une compétition simulée d'haltérophilie. Il reste à définir les répercussions à long terme de l'altération des paramètres psychophysiologiques sur la santé et la capacité de performance du sportif. Il serait également intéressant d'étudier l'influence de la restriction alimentaire sur le microbiote intestinal et les répercussions éventuelles sur l'axe intestin-cerveau.

Title : Influence of a dietary restriction period on salivary biomarkers of stress, psychological parameters and performance among high-level weightlifters

Keywords : Weight loss, stress, salivary cortisol, salivary α -amylase, mood, weightlifting

Abstract : Restricting dietary intake is a widespread method for losing weight in weight categories sports. Reduction of calorie intake results in an activation of the physiological stress systems, both at central and peripheral levels, aiming at preserving energy homeostasis. Nevertheless, the influence on physiological, psychological and physical parameters remains controversial and do not allows to clearly defining a negative impact of dietary restriction on health and performance level. The objective of this study was to evaluate the influence of a dietary restriction period on the psychophysiological indicators of stress, as well as the level of performance in high-level weightlifters.

Our results showed that dietary restriction did not modify weightlifting performance level, but resulted in an alteration of the psychological parameters. The dietary restriction period resulted in a dissociation of the activity of the physiological stress systems, as well as a modification of the hormonal responses to a simulated weightlifting competition. It remains to define the long-term impacts of the alteration of psychophysiological parameters on the athlete's health and performance capacity. It would also be interesting to evaluate the influence of dietary restriction on intestinal microbiota and the possible influences on the gut-brain axis.