



HAL
open science

Impact du Cycle Menstruel sur la Performance Physique dans le Football Féminin

Pierre-Hugues Igonin

► **To cite this version:**

Pierre-Hugues Igonin. Impact du Cycle Menstruel sur la Performance Physique dans le Football Féminin. Santé. Université Claude Bernard - Lyon I, 2023. Français. NNT : 2023LYO10181 . tel-04695838

HAL Id: tel-04695838

<https://theses.hal.science/tel-04695838v1>

Submitted on 12 Sep 2024

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.

**THESE de DOCTORAT DE
L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1**

**École Doctorale ED 205
Interdisciplinaire Sciences-Santé (EDISS)**

Discipline : Performance Sportive et PRévention des Blessures (SPIP)

Soutenue publiquement le 05/10/2023, par :
Pierre-Hugues IGONIN

**Impact du Cycle Menstruel sur la
Performance Physique dans le Football
Féminin**

Devant le jury composé de :

BABAULT Nicolas, PU, Université de Bourgogne, CAPS	Rapporteur
PRIOUX Jacques, PU, Ecole Normale Supérieure de Rennes, M2S	Rapporteur
TOURNY Claire, PU, Université de Rouen Normandie, CETAPS	Rapporteuse
ENEA Carina, MCF, Université de Poitiers, MOVE	Examinatrice
PIALOUX Vincent, PU, Université Claude Bernard Lyon I, LIBM	Président, Examineur
MARTIN Cyril, MCF, Université Claude Bernard Lyon I, LIBM	Directeur de thèse
BOISSEAU Nathalie, PU, Université Clermont Auvergne, AME2P	Co-directrice de thèse

Résumé

Résumé en français

À l'aube de la Coupe du Monde féminine de football 2023 en Australie et en Nouvelle-Zélande, le football féminin connaît une croissance constante, tant au niveau mondial qu'in situ en France. Ce sport intermittent se caractérise par une alternance entre des actions courtes et intenses, nécessitant également des temps de récupération variables. Ainsi, la performance physique des joueuses repose sur leur capacité à être rapides et à récupérer efficacement entre chaque action. Le cycle menstruel chez les femmes est marqué par d'importantes variations hormonales, entraînant de nombreuses modifications physiologiques. Dans un sport tel que le football, où les qualités physiques des joueuses sont déterminantes pour la performance, il est possible que le cycle menstruel puisse altérer certains paramètres physiologiques, ce qui reste encore peu étudié en raison des difficultés d'inclure des joueuses de haut niveau dans les protocoles de recherche.

Au cours de cette thèse, nous avons pu montrer que le cycle menstruel influence la performance physique des joueuses de football évaluée dans des situations écologiques, telles que les compétitions et/ou des entraînements. En effet, nous avons observé une diminution de la distance parcourue à vitesse élevée (entre 14 et 21 km.h⁻¹) lors de la phase folliculaire précoce (menstruations) pendant les matchs. De même, au cours de la phase folliculaire tardive, nous avons constaté une augmentation du nombre de sprints réalisés à des vitesses supérieures à 21 km.h⁻¹, ce qui a entraîné une modification du pattern de sprint des joueuses pendant cette phase. Ainsi, les joueuses effectuent un plus grand nombre de sprints courts en présence de concentrations en œstrogènes élevées et de concentrations de progestérone faible. Ces résultats mettent en évidence l'influence du cycle menstruel sur les capacités physiques lors des matchs de football féminin, ce qui peut moduler la performance globale. Par ailleurs, dans un contexte non compétitif, nous avons également constaté une amélioration de la performance lors de sprints sur de courtes distances (10 et 20 m) pendant la phase folliculaire tardive. Étant donné que la performance en football exige d'être rapide sur distances courtes, nos résultats tendent à suggérer un effet positif de cette phase sur la performance.

En tenant compte de l'ensemble de nos résultats dans la programmation des entraînements, il serait judicieux de proposer aux joueuses une approche individualisée en fonction de leur statut hormonal. Les exercices axés sur la vitesse de déplacement pourraient ainsi être particulièrement travaillés en phase folliculaire tardive, prédisposant ainsi les joueuses à des améliorations significatives de cette qualité.

Mots clés : football, cycle menstruel, hormones sexuelles, performance, vitesse.

Résumé en anglais

At the dawn of the 2023 FIFA Women's World Cup in Australia and New Zealand, women's football is experiencing steady growth both globally and locally in France. This intermittent sport is characterized by a combination of short, intense phases and variable recovery periods. Therefore, the physical performance of the players relies on their ability to be fast and recover effectively between each action. The menstrual cycle in women is marked by significant hormonal variations that lead to numerous physiological changes. In a sport like football, where the physical qualities of the players are crucial for performance, it is possible that the menstrual cycle may alter different physiological parameters. However, this topic remains relatively understudied due to the challenges of including high-level female players in research protocols.

During this thesis, we were able to demonstrate that the menstrual cycle influences the physical performance of female football players evaluated in real-life situations, such as competitions and training sessions. We observed a decrease in the distance covered at high intensity (between 14 and 21 km.h⁻¹) during the early follicular phase (menstruation) in matches. Similarly, during the late follicular phase, we found an increase in the number of sprints performed at speeds exceeding 21 km.h⁻¹, leading to a modification in the sprint pattern of the women during this phase. Thus, high-level female football players perform a greater number of shorter sprints when estrogen concentrations are high and progesterone concentrations are low. These results highlight the influence of the menstrual cycle on the physical abilities during women's football matches, which can impact overall performance. Additionally, in a non-competitive context, we also observed an improvement in performance during sprints over short distances (10 and 20 m) during the late follicular phase. Given that football performance requires speed over short distances, our results suggest a positive effect of this phase on performance.

Taking into account all of our findings in training programming, it would be advisable to offer women players an individualized approach based on their hormonal status. Exercises focused on speed could be particularly emphasized during the late follicular phase, predisposing high-level female football players to significant improvements in this quality.

Keywords: Football, menstrual cycle, sexual hormones, performance, speed.

Remerciements

Tout d'abord je souhaite remercier mes directeurs de thèse **Cyril & Nathalie** d'avoir accepté de m'accompagner durant ces années. **Cyril**, si je suis ici c'est en partie grâce à vous, vos retours à la suite de la présentation orale de mon mémoire de recherche en 2014 ont fait naître en moi cette envie d'aller au bout de ce projet scientifique « Cycle Menstruel et Football ». Cette découverte de la recherche scientifique a modifié ma façon de voir l'entraînement. Ce fût pour moi un honneur de vous solliciter en 2018 pour l'encadrement de ce travail mûri depuis des années. **Nathalie**, votre expertise scientifique et votre aisance à la mettre au profit de mon projet resteront des souvenirs forts lors de ma première venue au STAPS de Clermont-Ferrand. Votre complémentarité nous a permis d'avancer ensemble dans ce beau projet scientifique. Outre votre expertise scientifique, je voudrais également mettre en avant vos qualités humaines. Vous avez toujours fait preuve de bienveillance, de patience, et vos encouragements m'ont permis de prendre confiance en mes compétences scientifiques, je vous en suis très reconnaissant.

Merci aux **rapporteurs**, **Mme Claire TOURNY**, **M. Nicolas BABAULT** et **M. Jacques PRIOUX** d'avoir accepté de lire, d'expertiser et juger mon travail de thèse. Je vous prie de bien vouloir trouver ici l'expression de toute ma gratitude. Merci également à **Mme Carina ENEA**, **M. Vincent PIALOUX**, **examineurs**, de participer à l'évaluation de mon travail.

Merci à vous, **membres du jury**, pour le questionnement, les échanges scientifiques et perspectives qu'ils amèneront.

Merci à **M. Sébastien RATEL** et **M. Vincent PIALOUX** d'avoir fait partie de mon Comité de Suivi Individuel. Vos retours, votre compréhension et votre bienveillance tout au long de ces années de thèse me laissent de très bons souvenirs de nos échanges scientifiques.

Merci à **Mme Sylvie RICARD-BLUM**, Directrice de l'Ecole Doctorale EDISS, pour votre compréhension permettant l'aménagement de la durée de thèse. Veuillez trouver ici toute ma reconnaissance.

Merci à l'**Association Sportive de Saint-Etienne**, ainsi qu'à l'**Association Nationale Recherche Technologie** pour l'obtention du dispositif CIFRE, qui a pu me permettre d'allier la recherche

scientifique, à mon emploi de préparateur physique. Merci **M. Michel SAEZ, ancien Président de l'Association** ainsi qu'à **Hervé et Jérôme**, mes coachs, d'avoir cru en mon projet et de m'avoir laissé l'opportunité d'effectuer ce travail. Merci à M. **Jean-Marc BARSOTTI, Président de l'Association**, de m'avoir permis de bénéficier des structures et du matériel d'entraînement de l'A.S. Saint-Etienne pour la tenue des sessions expérimentales.

Merci aux **joueuses de l'Association Sportive de Saint-Etienne** d'avoir participé aux premiers protocoles de recherche sur le cycle menstruel en football féminin en France. Votre curiosité est récompensée puisque vous êtes les pionnières, vous pouvez en être « *Vertes et Fières !* ».

Suzy, j'espère que le déroulé des sessions expérimentales n'a enfin plus de secrets pour toi ! Je te remercie d'avoir été présente sur la majorité des sessions expérimentales et de m'avoir aidé dans la mise en place des tests. Bien que tes baskets blanches n'en gardent pas un souvenir mémorable, de mon côté, j'ai été très heureux de partager une partie de mon travail avec toi. Merci à mon « Diet' » préféré, **Thomas**, d'avoir accepté de nous accompagner dans ce travail. Ton expertise et ta rigueur ont été d'une grande aide dans le traitement des données anthropométriques et nutritionnelles. La salle de réunion du Salif Keita gardera le souvenir de nos nombreux échanges et rigolades pour un long moment !

Merci aux équipes du **Centre Hospitalier Universitaire de Saint-Etienne** représentées par le **Pr Rémi PHILIPPOT, Pr GONZALO, Dr Nadine RABY**. Merci également aux équipes de l'**Etablissement Français du Sang Auvergne Rhône-Alpes** représenté par le **Pr Fabrice COGNASSE, Dr Alain LEFEVRE** dans la collecte et l'analyse des prélèvements sanguins.

Merci également à **l'équipe du LIBM présente au centre de pathologie et biologie Est des Hospices Civils de Lyon** sans qui les mesures rhéologiques et hémodynamiques n'auraient pu être effectuées. **Camille, Elie**, merci d'avoir « *formé* » les étudiants de Master qui sont venus se joindre à nous sur ce travail.

Merci aux collègues du **LIBM**, bien que ma présence sur site fut marquée par les nombreux aller-retours entre Saint-Etienne et le Campus, les moments passés ensemble nous ont permis d'échanger et de collaborer activement. Merci **Qingshan** pour la formation au « profilage » Force-Vitesse et merci **Jérémie** de travailler à ton tour, sur l'impact du cycle menstruel sur les propriétés mécaniques musculotendineuses.

Merci à **Nathan, Mélanie, Ouissem, Malorie, Garance, Manon, Pierrick, Aloïs** de nous avoir accompagné quelques semaines et d'avoir manifesté votre envie de participer à ce projet de recherche. J'espère que cette expérience aura été riche d'enseignements.

Merci à **Charlotte** (capitaine emblématique des Vertes), **Jérôme** (mon Coach), **Manon** (à qui j'espère avoir transmis la *fibre* et la curiosité de la recherche) de m'avoir fait l'honneur de prendre le temps d'écrire quelques lignes pour la préface de ce manuscrit.

Merci enfin à **ma Famille** d'avoir fait de moi un homme curieux et rigoureux. Votre présence, pudique mais sincère m'anima toujours. Une pensée également, pour ceux qui ne sont plus avec nous et qui continuent de nous accompagner malgré leur absence.

Ces derniers mots vont à ma compagne et mon fils. **Cathy**, Merci pour ton soutien sans faille, au quotidien. Merci de me suivre et de m'accompagner dans ce que j'entreprends. **Jules**, attendant que tu puisses lire ce travail, j'ai hâte de pouvoir te lire ce « livre » que j'écris depuis tous ces mois.

Merci



Préface



« Dans le Code du Football, aucune règle ne dit que les femmes ne peuvent pas jouer au football. Le travail réalisé par Pierre-Hugues, à travers cette thèse et également à travers son travail effectué au quotidien avec nous est un atout majeur pour le développement du Football Féminin.

A travers mes nombreuses années passées avec Pierre-Hugues au sein de l'Association Sportive de Saint Etienne, grâce à la curiosité dont il fait part, j'ai pu voir l'évolution de son travail au fil des années. J'ai pu profiter de son professionnalisme, de son écoute et de sa présence au quotidien. Cet accompagnement a été primordial pour moi en tant que joueuse. Par cette étude, Pierre-Hugues a mis en lumière un sujet parfois tabou pour nous joueuses.

Les tests que j'ai pu réaliser lors de cette étude m'ont permis en tant que sportive de haut niveau : de travailler sur mes performances mais également d'en apprendre davantage sur les réactions de mon corps à chaque phase de mon cycle menstruel. Ces nombreux tests ont toujours été réalisés dans la bienveillance, le sérieux et la bonne humeur. Je tiens, encore une fois, à remercier Pierre-Hugues pour son accompagnement et pour sa présence afin de me permettre d'atteindre mes objectifs individuels mais également collectifs, d'évaluer mon niveau de forme ou de fatigue durant les étapes de mon cycle. »

Charlotte GAUVIN, Capitaine, Joueur A.S. Saint-Etienne (2005-2021)

182 matchs joués en D1 & D2, 169 fois titulaire

Participante à nos protocoles de recherche

Une décennie au service du football féminin !

Si l'enseignement du football reste le même, Pierre-Hugues s'est attaché à comprendre tout au long de son cursus universitaire les spécificités de la pratique féminine et sa singularité. L'expertise dont il fait preuve maintenant s'est affinée au fil des saisons avec un seul objectif : permettre à la joueuse de performer en individualisant le travail athlétique.

Du début du protocole jusqu'à sa fin, Pierre-Hugues a su fédérer autour de lui l'ensemble du staff ainsi que les joueuses pour mener à bien son étude dans un contexte particulier (Covid-19, entraînant l'arrêt des compétitions et des entraînements) et sans jamais faillir dans sa mission d'adjoint et de préparateur physique. Alors certes, les résultats présentés ce jour achèveront des années d'études scientifiques, d'analyse de données, de stats, de graphiques pour les universitaires, les techniciens mais personne n'aura eu la chance comme moi, d'assister de près à la naissance du projet jusqu' à sa finalisation, aux doutes, aux échanges, aux partages d'expériences aux difficultés que peuvent rencontrer les hommes de « terrains ». En cela, je l'en remercie et je me réjouis de savoir que ses recherches sur l'impact des menstruations dans la performance sportive vont assurément modifier l'approche de l'entraînement et sa dynamique des charges.



Jérôme BONNET, Entraîneur A.S. Saint-Etienne (2017-2022)

Titulaire Diplôme d'Etat supérieur de la Jeunesse, de l'Education Populaire et du Sport (DESJEPS)
Entraîneur U19 Nat., Coordinateur Technique et Administratif A.S. Saint-Etienne (2012-2017)



« Au cours de mon stage de Master 2, j'ai eu le privilège de découvrir les coulisses des expérimentations de la thèse de Pierre-Hugues Igonin, jusqu'alors bouleversées par la crise du Covid-19. C'est une expérience qui a élargi ma vision de la recherche, m'a rappelé l'importance du terrain et de la nuance, de la méthodologie et de la patience. Cette thèse est un jalon essentiel dans l'exploration de la performance sportive féminine, témoin du dévouement de Pierre-Hugues à la compréhension et à l'optimisation des footballeuses féminines. Pierre-Hugues est un précurseur et expert dans le domaine de la préparation physique du football féminin. Cette recherche, axée sur l'impact des cycles menstruels dans le football, va au-delà des limites conventionnelles et apporte un éclairage

nouveau, un aspect crucial, pourtant souvent négligé, du sport féminin. »

Manon DAUVERGNE, Kinésithérapeute, Doctorante

Kinésithérapeute du sport et en santé abdomino-pelvienne

Effet des phases du cycle menstruel chez l'athlète féminine sur la performance neuromusculaire et les adaptations après un entraînement en résistance

Laboratoire Irisse, Université de La Réunion & laboratoire MIP, Le Mans Université

*Ne crains pas d'avancer lentement,
crains seulement de t'arrêter.*

Proverbe Chinois

Sommaire

<i>Abréviations</i>	12
<i>Liste des figures et tableaux</i>	13
<i>Avant-propos</i>	14
PARTIE I – REVUE DE LITTERATURE	16
Chapitre 1 – Les déterminants physiques de la performance en football	17
1. Qualités physiques mises en jeu en football	20
2. La contraction musculaire	24
2.1. Les étapes de la contraction musculaire	24
2.2. Les déterminants structuraux	26
2.3. Les déterminants nerveux	28
3. Le métabolisme énergétique	29
3.1. Voie anaérobie alactique	30
3.2. Voie anaérobie lactique	31
3.3. Voie aérobie	31
3.4. Répétition d'efforts maximaux	32
Chapitre 2 – L'analyse du football féminin	34
1. Analyse de la dimension physique en match à haut niveau	35
1.1. Diversité et variété des déplacements	36
1.2. Distance totale parcourue	36
1.3. Distance parcourue à faible vitesse (< 15 km.h ⁻¹)	37
1.4. Distance parcourue à vitesse élevée et en sprint (> 15 km.h ⁻¹)	37
1.5. La répétition des courses à vitesse élevée	39
1.6. Les facteurs contextuels et environnementaux	42
2. Analyse de la dimension technique et tactique en match à haut niveau	44
2.1. Passes et taux de réussite	44
2.2. Temps de possession et touches de balle	45
2.3. Actions offensives et défensives	46
2.4. Les facteurs contextuels	47
2.5. Les facteurs tactiques	47

2.6. Spécificités du poste de gardienne	48
3. Éléments de comparaison avec le football masculin	48
Chapitre 3 – Cycle menstruel et variations hormonales	53
1. La physiologie du cycle menstruel	54
1.1. La régulation hormonale au cours du cycle menstruel	54
1.2. Les phases du cycle menstruel	56
2. Effets des hormones sexuelles sur les grandes fonctions physiologiques	57
2.1. Influence des hormones sexuelles sur la composition corporelle	58
2.2. Influence des hormones sexuelles sur la fonction neuro musculaire	59
2.3. Influence des hormones sexuelles sur la fonction métabolique	62
Chapitre 4 – L’influence des hormones sexuelles sur les performances physiques	69
1. Influence des hormones sexuelles sur la perception de la performance	70
2. Performance et composition corporelle	71
3. Influence des hormones sexuelles sur la performance de type anaérobie	72
4. Influence des hormones sexuelles sur la performance de type aérobie	74
5. Influence des hormones sexuelles sur la fatigabilité	75
5.1. Fatigabilité de la fonction neuro musculaire	75
5.2. Fatigabilité de la fonction métabolique	77
6. Influence des hormones sexuelles sur le risque de blessures	79
7. Influence des hormones sexuelles sur la performance en football féminin	81
8. Précautions à prendre avant de travailler sur la thématique : cycle menstruel et performance	83
8.1. Critères d’inclusion et de non-inclusion des participantes	83
8.2. Monitoring menstruel pour subdiviser les phases du cycle menstruel	84
8.3. Choix des phases et actions hormonales associées	84
Chapitre 5 – Problématique et objectifs de recherche	88
1. Problématique	89
2. Objectifs et hypothèses	89
PARTIE II – TRAVAUX PERSONNELS	91
1. Introduction	91
2. Méthodologie de la recherche	92

2.1. Participantes	92
2.2. Monitoring menstruel	95
2.3. Dosages hormonaux	95
3. Etude 1 : Influence des différentes phases du cycle menstruel sur les déplacements en match chez des joueuses de football semi-professionnelles	106
3.1. Objectifs de cette 1ère étude	106
3.2. Design expérimental	106
3.3. Résultats	107
4. Etude 2 : Les différents effets du cycle menstruel sur les facteurs déterminants de la performance chez des joueuses de football semi-professionnelles	108
4.1. Objectifs de cette 2ème étude	131
4.2. Design expérimental	131
4.3. Résultats	134
PARTIE III – CONCLUSION GENERALE, APPLICATIONS PRATIQUES & PERSPECTIVES	136
1. Synthèse de nos principaux résultats	137
2. Limites de nos études	142
3. Applications pratiques	142
4. Perspectives du travail	144
PARTIE IV – BIBLIOGRAPHIE	146
PARTIE V – ANNEXES SCIENTIFIQUES	174
1. Publications scientifiques	174
1.1. Publications, premier auteur	174
1.2. Publication, co-auteur	174
2. Diffusion et valorisation des résultats	187
2.1. Communications orales lors de congrès nationaux	187
2.2. Communications orales lors de formations fédérales et nationales	187
2.3. Interviews et vulgarisation scientifique dans les médias	187

Abréviations

Acétyl-CoA : acétyl-coenzyme A

ADP : adénosine diphosphate

ATP : adénosine tri-phosphate

Ca²⁺ : ion calcium

CO₂ : dioxyde de carbone

CM : cycle menstruel

CK : créatine kinase

E2 : 17β-estradiol

ERα : récepteur α aux œstrogènes

ERβ : récepteur β aux œstrogènes

FC : fréquence cardiaque

FP : (phase) folliculaire précoce

FT : (phase) folliculaire tardive

FSH : hormone folliculostimulante

G6P : glucose-6-phosphate

GnRH : Gonadotropin-Releasing Hormone

H⁺ : ion hydrogène

H₂O : eau

HPG : (axe) hypothalamo-hypophysio-gonadique

La : lactate

LCA : ligament croisé antérieur

LH : hormone lutéinisante

LP : (phase) lutéale précoce

LT : (phase) lutéale tardive

ML : (phase) mi-lutéale

NAD⁺ : nicotinamide adénine dinucléotide

NADH : hydrure de nicotinamide adénine dinucléotide

O₂ : oxygène

P4 : progestérone

PCr : phosphocréatine

PFK : phosphofructokinase

Pi : phosphate inorganique

THS : traitement hormonale de substitution

VO₂ : consommation d'oxygène

VO_{2max} : consommation maximale d'oxygène

Liste des figures et tableaux

Figure 1. <i>Approche holistique des déterminants de la performance sportive (Bangsbo et coll., 2006)</i>	<i>p.19</i>
Figure 2. <i>Principaux déterminants physiologiques de la performance en sports collectifs (Bishop et Girard, 2013)</i>	<i>p.20</i>
Figure 3. <i>Cycle de la contraction musculaire</i>	<i>p.25</i>
Figure 4. <i>Variations hormonales durant le cycle menstruel (Illustration issue de l'application Clue®, https://helloclue.com/fr)</i>	<i>p.54</i>
Figure 5. <i>Les différentes phases du cycle menstruel (Carmichael et coll., 2021)</i>	<i>p.56</i>
Figure 6. <i>Représentation des étapes préalables à l'inclusion des participantes</i>	<i>p.94</i>
Figure 7. <i>Représentation du protocole expérimental de l'étude 2</i>	<i>p.133</i>
Tableau 1. <i>Caractéristiques physiques des participantes aux études</i>	<i>p.93</i>

Avant-propos

A quelques semaines de l'ouverture de la Coupe du Monde Féminine 2023 en Australie et Nouvelle-Zélande, l'engouement autour du football féminin ne cesse de croître. La dernière Coupe du Monde Féminine, organisée en France en 2019, fut la plus regardée avec plus de 1,12 milliards de téléspectateurs à travers le monde, dont 260 millions pour la finale opposant les Etats-Unis et les Pays-Bas (article de presse, site internet FIFA). En 4 ans, date de la précédente Coupe du Monde au Canada, ce sont plus de 500 millions de nouveaux téléspectateurs qui se sont passionnés pour la pratique féminine. Fort de cet engouement médiatique, la Fédération Internationale de Football Association (FIFA) a pour objectif d'ici 2026 d'atteindre la barre des 60 millions de licenciées (13,3 millions en 2019). Alors que l'interdiction de pratiquer le football imposée aux femmes en 1921 n'a été levée qu'en 1971, le nombre de licenciées et les perspectives actuelles d'évolution ne font que renforcer l'essor autour du football féminin au niveau mondial. Néanmoins, le nombre de joueuses licenciées en France (près de 200 000) est très largement inférieur à leur homologues masculins (1,8 million). Cette disparité dans le nombre de pratiquant se retrouve au niveau scientifique.

En effet, alors que l'essor du football féminin met en avant la nécessité pour les entraîneurs d'appréhender la demande physiologique, physique ou encore les spécificités techniques d'un match, les publications scientifiques en football féminin sont très largement minoritaires (Costello et coll., 2014 ; Mujika et coll., 2019). Ainsi, parmi les 16 822 articles scientifiques publiés entre 1970 et 2019, seulement 3 242 études concernaient les joueuses dont 919 les joueuses professionnelles (Kirkendall et Krustup, 2021). Cette différence s'explique par la complexité d'analyser la population féminine du fait des variations hormonales inhérentes au cycle menstruel (Bruinvels et coll., 2017). Alors que 79 % des sportives perçoivent une altération de leurs capacités physiques durant le cycle menstruel, il est à noter que ce dernier n'est pas pris en compte dans l'entraînement (García-Pinillos et coll., 2021). En effet, pour 71 % des sportives interrogées, cette spécificité n'entre pas dans le paramétrage des séances d'entraînement. Paradoxalement, ce constat est d'autant plus vrai à haut niveau (García-Pinillos et coll., 2021), là où les entraîneurs et préparateurs physiques cherchent à individualiser l'entraînement pour optimiser les adaptations physiologiques. Cela met en évidence l'importance de sensibiliser et de former les entraîneurs à l'influence du cycle menstruel sur les facteurs de performance et les réponses physiologiques associées à l'entraînement.

A ce jour, une seule étude a étudié l'influence du cycle menstruel sur la performance de joueuses au cours d'un match de football (Julian et coll., 2021). La performance physique, évaluée en match au

cours de la phase folliculaire et la phase lutéale, n'est pas altérée sous l'influence des variations hormonales. Néanmoins, leurs conclusions sont à interpréter avec prudence puisque les performances n'ont été analysées qu'au cours de la phase folliculaire et lutéale. Ces travaux illustrent la complexité d'analyser l'influence du cycle menstruel sur la performance sportive. En effet, depuis de nombreuses années, de nombreuses divergences méthodologiques existent dans les protocoles expérimentaux étudiant le cycle menstruel. Ainsi, et afin de garantir un cadre commun aux futurs protocoles, des recommandations méthodologiques ont vu le jour (de Jonge et coll., 2019 ; Elliott-Sale et coll., 2021). Ces dernières permettront aux équipes de recherche d'analyser avec précision (phases étudiées, vérification hormonale utilisée, ...) l'influence hormonale sur la performance sportive.

Le premier objectif de cette thèse a donc été d'évaluer l'influence des différentes phases du cycle menstruel au cours d'un match de football féminin afin d'identifier le rôle des variations hormonales sur la performance physique.

On sait qu'au cours de la phase folliculaire les concentrations en œstrogènes varient considérablement entre le début et la fin de cette phase, c'est la raison pour laquelle nous évaluerons la performance au cours de 3 phases distinctes du cycle menstruel (phase folliculaire précoce, phase folliculaire tardive, phase mi-lutéale). Ces phases, retenues en accord avec les récentes recommandations méthodologiques, présentent des concentrations en œstrogènes et progestérone (ainsi que le rapport œstrogènes/progestérone) différentes permettant de déterminer l'influence potentielle des hormones sexuelles féminines sur la performance physique.

Le second objectif de cette thèse a donc été de déterminer dans un contexte écologique mais non compétitif, l'influence des variations hormonales sur les déterminants physiologiques de la performance physique en football féminin.

L'influence du cycle menstruel semblerait différer en fonction des qualités physiques déterminantes en football féminin. Leur évaluation, spécifique, met en évidence des modifications de niveau de performance, bien que les qualités physiques soient interdépendantes. Ainsi, la prise en considération dans l'entraînement du statut hormonal des joueuses semblerait être une nouvelle possibilité d'individualisation de l'entraînement. L'ajout de ces données physiologiques dans le monitoring des joueuses permettrait ainsi de proposer un contenu de séance plus adapté, d'optimiser les gains de l'entraînement et, potentiellement, la performance en football féminin.

Cette thèse effectuée en tant que salarié-doctorant a été initiée dans le cadre du dispositif CIFRE (Conventions Industrielles de Formation par la REcherche), financée par l'Association Sportive de Saint-Etienne avec le soutien de l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie.

PARTIE I

REVUE DE LITTERATURE

Le football est l'un des sports les plus populaires au monde, tant sur le nombre de pratiquants que sur le nombre de spectateurs. Cet engouement se traduit également d'un point de vue scientifique puisque le football est le sport le plus étudié dans la communauté scientifique. De nombreux travaux ont permis de quantifier ce que représentait un match de football en termes de dépense énergétique, de distance parcourue, d'actions de jeu réalisées... Ces analyses ont également permis de faire des comparaisons et mettre en évidence des différences en fonction du niveau de jeu, du poste de jeu, de l'âge, ou encore du sexe. Bien que le football féminin soit en plein développement, il existe encore d'importantes inégalités entre le football masculin et féminin. De 1970 à 2019, sur les 16822 études en football qui ont été publiées, seulement 3242 concernaient des femmes (dont 919 étaient des joueuses professionnelles), et la plupart des travaux effectués traitaient de la nature et prévention des blessures (Kirkendall et Krstrup, 2022). A titre d'exemple, les premiers travaux associant la diminution de la performance en match en lien avec la déplétion des stocks de glycogène musculaire datent du début des années 1970 chez l'homme (Saltin, 1973). Il aura fallu attendre 50 ans, pour que paraissent les premières études sur les réponses métaboliques au cours d'un match de football chez la femme (Krstrup et coll., 2022 ; Mohr et coll., 2022). Ces chiffres mettent en évidence une importante disparité dans les publications scientifiques et expliquent en partie la méconnaissance des spécificités de la pratique féminine dans ce sport.

Chapitre 1 – Les déterminants physiques de la performance en football

La performance en football dépend de nombreux facteurs d'ordre techniques, tactiques mais également physiques et mentaux. Ces facteurs sont étroitement liés et dépendants les uns des autres (Bangsbo et coll., 2006). Ainsi, la performance physique interfère directement avec la performance technique et tactique au cours d'un match (Lippi et coll., 2007). Durant leurs actions (course, réalisation technique), les joueurs doivent également prendre en compte de nombreux paramètres de leur environnement (partenaires, adversaires, ballon). La performance nécessite donc d'être capable de traiter ces informations rapidement et efficacement pour prendre les décisions adaptées au contexte (Wallace et Norton, 2014). Pour preuve, si un joueur n'est pas en mesure d'identifier le problème d'ordre tactique que lui pose l'adversaire, sa réponse motrice ne sera probablement pas adaptée, et donc inefficace. Toute action effectuée en match implique donc, en plus de la dimension physique, des composants perceptivo-cognitifs (Paul et coll., 2016). Cela est d'autant plus vrai que le défenseur est proche, et sur les actions nécessitant une importante vitesse d'exécution (Paul et coll., 2016).

Au cours d'un match de football, l'activité des joueurs est intermittente, alternant entre la réalisation d'actions courtes et intenses (< 10 s), et des temps de récupération plus ou moins long (< 60 s) (Girard et coll., 2011). En effet, les joueurs effectuent entre 1350 et 1650 changements d'activité (accélération, changements de direction, décélérations, courses linéaires, ...), ce qui représente un changement d'activité toutes les 4 secondes environ (Andersson et coll., 2010 ; Gabbett et Mulvey, 2008 ; Mohr et coll., 2008 ; Datson et coll., 2017). Ainsi, le joueur doit être un athlète « complet » qui doit à la fois, être rapide sur de courts laps de temps et de courtes distances, être puissant et fort pour résister à son adversaire ou encore frapper au but ou effectuer des passes longues, être capable de récupérer rapidement et efficacement entre chaque action, et être capable de maintenir un haut niveau de performance physique sur toute la durée du match de 90 min. Ainsi bien que dépendante de l'ensemble des autres facteurs de performance, la performance en football est dépendante de nombreux facteurs physiques tels que les qualités de vitesse, d'agilité, de force, de puissance musculaire ou encore d'endurance faisant appel à de nombreux déterminants physiologiques (Figure 1, Bangsbo et coll., 2006).

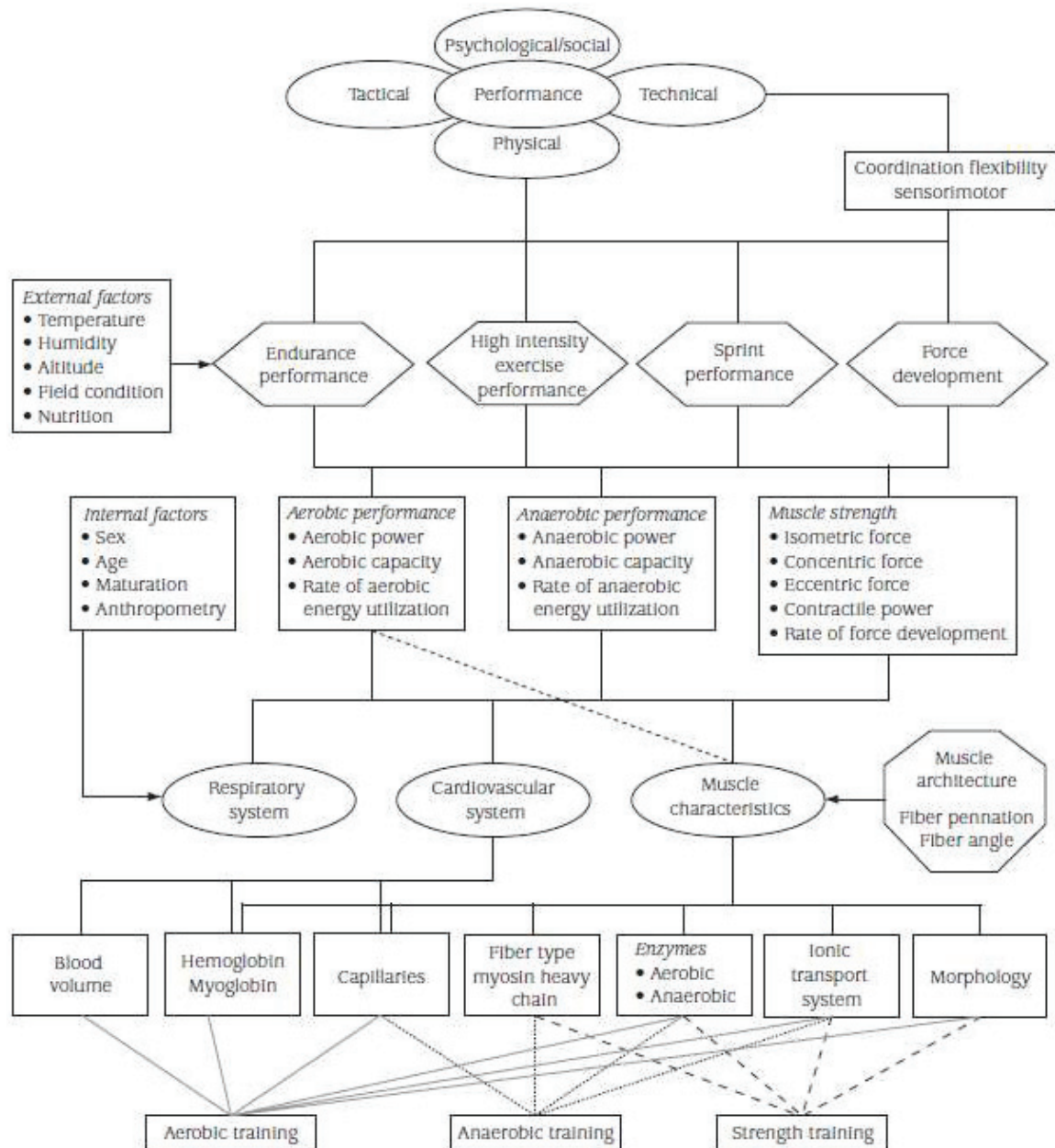


Figure 1. Approche holistique des déterminants de la performance sportive (Bangsbo et coll., 2006)

Quelle que soit l'action effectuée au cours du match ; un déplacement, un geste technique ou encore un bondissement, le joueur va solliciter son système musculo-squelettique afin de produire du mouvement. Les os, cartilages et ligaments constituent la partie « passive » de ce système, où le complexe musculo-tendineux (partie « active ») joue un rôle prépondérant. Au cours d'un match de football, l'activité musculaire est déterminante et reste dépendante de caractéristiques telles que l'intensité de la contraction ou encore, de la durée de la sollicitation. L'activité musculaire étant une grande consommatrice d'énergie (Periasamy et coll., 2017), le métabolisme énergétique est également

un déterminant prépondérant de la performance en football permettant, via les différentes voies métaboliques et réactions chimiques associées, la resynthèse d'adénosine triphosphate (ATP).

1. Qualités physiques mises en jeu en football

Le football est caractérisé par une grande diversité d'actions individuelles effectuées au cours d'un match, comprenant des sprints courts, des accélérations et décélérations sur de courtes distances, des changements de direction, des sauts, des duels, des frappes ou encore des tacles (Bangsbo et Michalsik, 2002 ; Wisloeff et coll., 1998). A haut niveau, la capacité à alterner des efforts intenses sur de courtes distances, et des temps de récupération plus ou moins longs, est donc indispensable pour être performant (Rampinini et coll., 2007 ; Chaouachi et coll., 2010 ; Gabbett et coll., 2013). Les exigences physiques sont complexes, nécessitant pour les joueurs de posséder des qualités physiques diversifiées (force, vitesse, endurance) et une capacité à récupérer rapidement et efficacement entre chaque effort (Figure 2, Bishop et Girard, 2013).

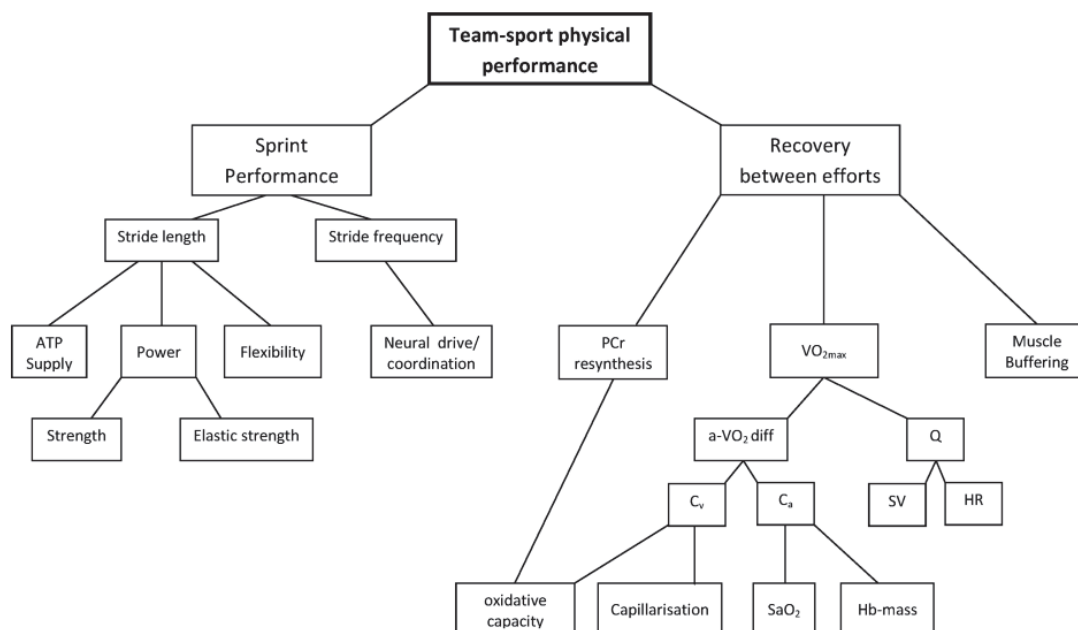


Figure 2. Principaux déterminants physiologiques de la performance en sports collectifs (Bishop et Girard, 2013)

L'analyse de l'activité en match (*Chapitre 2*) a permis de déterminer les différentes actions réalisées au cours d'un match de football : courses, sauts, actions techniques (passes, frappes, tacles, duels). Toutes ces actions mettent simultanément en jeu les qualités physiques puisque ces dernières sont interdépendantes (Bangsbo et coll., 2007). Selon la classification de Letzelter (1990), la condition physique s'explique par des qualités physiques « conditionnelles » (liées aux processus énergétiques) ;

la force, la vitesse et l'endurance et des qualités physiques de « coordination » (fondamentales dans la coordination des qualités physiques conditionnelles) ; l'équilibre, l'adresse, la souplesse. En football, les différentes actions motrices réalisées par les joueurs sollicitent l'ensemble de ces différentes qualités physiques.

Au cours d'un match les joueurs parcourent entre 10,3 et 10,8 km selon les postes de jeu (Datson et coll., 2017 ; Trewin et coll., 2018a ; Bradley et coll., 2014). La diversité des actions à réaliser durant 90 minutes implique une sollicitation cardio-respiratoire importante puisque la fréquence cardiaque (FC) moyenne est de $86 \pm 3\%$ de la FC maximale, avec des pics pouvant atteindre $98 \pm 1\%$ (Datson et coll., 2014) pour une consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) moyenne estimée entre 77 et 80 % avec des pics pouvant aller jusqu'à 96% de la consommation maximale en oxygène ($\dot{V}O_{2max}$) (Mohr et coll., 2004 ; Krstrup et coll., 2005). Le système cardio-respiratoire, constitué de l'appareil respiratoire et de l'appareil cardiovasculaire, est donc fortement sollicité au cours d'un match. En effet, ces données mettent en évidence une importante sollicitation cardio-respiratoire, avec des périodes où la sollicitation est quasi-maximale (Krstrup et coll., 2005). Cette aptitude à maintenir un effort d'une intensité relative donnée pendant toute la durée du match définit **l'endurance** indispensable en football (Hoff et coll., 2002). Le système cardio-respiratoire est un déterminant de la qualité d'endurance puisqu'il va permettre à l'organisme de pouvoir acheminer l' O_2 issu de la respiration vers les cellules musculaires où le métabolisme aérobie permettra l'oxydation de substrat afin de pouvoir répondre aux exigences physiologiques engendrées par la durée du match, ou l'enchaînement de matchs. Ainsi, le débit cardiaque (FC, volume d'éjection systolique), la pression artérielle, la résistance vasculaire, la capillarisation, le taux d'hémoglobine, la $\dot{V}O_{2max}$, la ventilation sont des déterminants physiologiques ayant une influence sur la performance en football.

Entre la 1^{ère} et la 2^{nde} mi-temps d'un match de football, l'activité (*exprimée en distance parcourue*) des joueurs diminue (Vescovi et Favero, 2014 ; Panduro et coll., 2022). Cette diminution est visible quelle que soit l'intensité de la course (Harkness-Armstrong et coll., 2022). La distance moyenne parcourue par course à vitesse élevée au cours de la 2^{nde} mi-temps est également plus courte qu'en 1^{ère} mi-temps (Vescovi, 2014 ; Mara et coll., 2017b ; Nakamura et coll., 2017), tandis que le temps moyen entre chaque action augmente (Mara et coll., 2017b ; Nakamura et coll., 2017). Cette diminution de l'activité entre les mi-temps est également constatée au cours d'une même mi-temps (Hewitt et coll., 2014 ; Datson et coll., 2017). La **capacité des réitérer des actions** intenses sur toute la durée du match dépend à la fois de la performance en sprint (*déterminants abordés ci-après*) mais surtout de la capacité à récupérer entre les efforts (Bishop et coll., 2011). La capacité de réitérer des actions intenses est une qualité physique primordiale de la performance physique en football, car elle influence le résultat final d'un match. En effet, être rapide et pouvoir maintenir une vitesse élevée durant toute la durée d'un

match permet de réaliser des actions souvent décisives en fin d'un match (Gabbett et coll., 2013 ; Rampinini et coll., 2007). La capacité de récupération entre les efforts est déterminée par la vitesse de resynthèse de la phosphocréatine (PCr), de la $\dot{V}O_2\text{max}$, et du pouvoir tampon des ions H^+ produits au cours d'efforts impliquant le métabolisme énergétique anaérobie lactique (Bishop et coll., 2011). La fatigabilité est notamment visible au cours d'une répétition de sprints par la diminution progressive de la vitesse de course, conséquence d'une altération au niveau central et périphérique. La fatigue « centrale » affecte le système nerveux, en amont de la jonction neuromusculaire entraînant une altération du recrutement des unités motrices. La fatigue « périphérique » quant à elle altère la production de force au niveau musculaire. Sur le plan physiologique, la fatigue musculaire est déterminée par une diminution de l'excitabilité neuromusculaire, la perturbation de la resynthèse de la PCr (Mendez-Villanueva et coll., 2012), et l'accumulation de métabolites tels que H^+ , ou le phosphate inorganique (Bishop et coll., 2011).

Quel que soit le poste de jeu, la distance moyenne parcourue au cours d'un sprint est inférieure à 5 m ou 10 m dans respectivement 76 % et 95 % des cas (Datson et coll., 2017). La **vitesse** qui se définit comme la capacité à accomplir des actions motrices dans un temps le plus court possible, est une qualité physique déterminante en football (Faude et coll., 2012 ; Bishop et Girard, 2013), et est discriminante sur le niveau de jeu et le poste occupé. En effet, la vitesse maximale de course atteinte par les joueuses sur de courtes distances (0 à 20 m) est plus élevée chez les joueuses internationales que les joueuses évoluant en 1^{ère} division, ou 2^{nde} division (Haugen et coll., 2012). Tandis que les milieux centrales atteignent des vitesses maximales de course plus faibles que les autres joueuses (Scott et coll., 2020, Harkness-Armstrong et coll., 2021). Bien qu'elle s'exprime aussi bien dans la réalisation d'un sprint sur une distance plus ou moins courte, au cours d'une course linéaire ou comprenant des changements de direction, ou encore en réponse à un stimulus plus ou moins complexe, la vitesse de course est déterminée par la longueur et la fréquence de la foulée. Cela implique donc des déterminants nerveux (vitesse de transmission de l'influx nerveux, activation musculaire, recrutement des unités motrices, coordination intramusculaire) et des déterminants structuraux permettant de générer de la force. En effet, la force est « une expression motrice des ressources structurelles » (Aubert, 2005). Ainsi, des déterminants structuraux tels que la typologie musculaire, la taille des fibres musculaires, l'architecture musculaire, la vitesse de libération du calcium (Ca^{2+}), la vitesse enzymatique, ou encore la composante élastique et réactive des fibres musculaires, sont impliqués dans la génération de la force, indispensable à l'expression des qualités de vitesse. La composante élastique et réactive des muscles (cycle étirement-détente) est déterminante de la qualité de vitesse, puisqu'elle intervient au cours des nombreuses sollicitations pliométriques des membres inférieurs

(Young et coll., 1995a). La capacité du muscle à générer une contraction maximale est indispensable pour l'activité à haute intensité en match.

La contraction musculaire permet de générer un certain niveau de force, dépendant des paramètres structuraux évoqués. Cette force de contraction, ainsi que la vitesse de contraction déterminent la puissance de la contraction musculaire. La puissance musculaire d'un joueur peut ainsi se définir comme la force qu'il est possible de développer, en fonction de la vitesse à laquelle il se déplace. En football, la notion de temps est importante. Pour prendre le dessus sur un adversaire, le joueur va devoir mobiliser une puissance musculaire dans un temps le plus court possible. Ainsi, **l'explosivité** est une qualité essentielle qui permet ainsi aux joueurs les plus explosifs de produire et d'appliquer une force importante à une vitesse élevée de déplacement en un minimum de temps (Arnason et coll., 2004). Ainsi, la capacité de changer très rapidement de direction (Withers et coll., 1982), la hauteur de saut (Wisløff et coll., 2004) sont corrélés à la puissance musculaire, tout comme la vitesse de la balle lors d'une frappe (Sedano et coll., 2009). La performance nécessite également d'être capable de produire de hauts niveaux de force mais à une vitesse de déplacement plus faible, comme lors des duels face à un adversaire. En effet, au cours d'un match, les joueurs ne sont en possession du ballon, en moyenne, que durant 67 ± 3 secondes (Bradley et coll., 2014). Durant ces différents temps de possession, les joueurs vont devoir résister à la présence voire à la charge d'un adversaire. Cette lutte pour la protection, ou la récupération de la balle en phase défensive (tacle, duels) nécessitera des niveaux de force élevés, s'exprimant à une vitesse moindre, au niveau des membres inférieurs, mais également au niveau des membres supérieurs. Enfin, des niveaux de force maximale élevés jouent également un rôle préventif puisqu'en football la force maximale et la puissance d'extension des membres inférieurs permettent la réduction du nombre de blessures (Arnason et coll., 2004).

En football, les actions à réaliser sont imprévisibles car elles dépendent de nombreux paramètres (possession du ballon, présence d'adversaire/partenaire, trajectoire du ballon, mouvements des joueurs). Ainsi la capacité des joueurs à se mettre rapidement en mouvement tout en réagissant à des stimuli fait appel aux déterminants nerveux et structuraux de la vitesse mais également à des déterminants perceptifs et décisionnels (anticipation, reconnaissance et connaissance de la situation, prise d'information, Sheppard et Young, 2006). **L'agilité** est donc une qualité complexe, mettant en jeu différents déterminants perceptifs, décisionnels, nerveux mais également structuraux. Elle peut se définir comme *un mouvement rapide du corps entier avec changement de vitesse ou de direction en réponse à un stimulus* (Sheppard et Young, 2006). La nécessité de devoir prendre en compte les déplacements des joueurs, les trajectoires de la balle au cours des passes, et prendre les décisions motrices et techniques permettant de répondre aux situations dans un temps réduits met en évidence l'importance de cette qualité perceptivo-cognitive en football (Paul et coll., 2016).

Enfin, les qualités physiques de « coordination », selon la classification de Letzelter (1990), assurent la coordination des qualités physiques conditionnelles. La précision et le degré de finesse du mouvement (dépendant du nombre de fibres innervées par un même motoneurone), l'aisance et la richesse motrice permettent ainsi de coordonner les différentes qualités physiques conditionnelles. Certaines qualités (vitesse, force) sont étroitement liées et dépendantes les unes des autres puisqu'elles sont régies par des déterminants communs (Bangsbo et coll., 2006). Ainsi il existe de nombreuses corrélations entre les différentes qualités physiques. Pour preuve, la puissance des membres inférieurs (exprimée par la hauteur de sauts) est associée à la performance mesurée sur un sprint comprenant 6 changements de direction (« SRED3-90 », Kapidžić et coll., 2011). La capacité de réitérer les sprints (6 sprints de 30 m, récupération active de 20 s entre chaque sprint) est corrélée non seulement à la vitesse sur une courte distance (20 m), mais également à l'endurance (test navette 20 m) (Pyne et coll., 2008).

Pour être performant en football, les joueurs doivent donc être ; rapides sur de courtes distances (i), puissants et aptes à exprimer des niveaux de forces élevées lors des duels ou encore frapper (ii), capables de récupérer rapidement et efficacement entre chaque action (iii), et enfin, capables de maintenir un haut niveau de performance physique sur toute la durée du match de 90 min (iv). La performance en football met donc en jeu différentes qualités physiques (endurance, capacité à réitérer des sprints, vitesse, force, agilité) dont leur niveau de performance s'explique par de nombreux déterminants. Qu'ils soient d'ordre nerveux, structurels, métaboliques, ces déterminants influencent les qualités physiques et *in fine* les actions à réaliser au cours d'un match. Nous caractériserons dans le chapitre suivant l'activité à haut niveau au cours d'un match de football féminin (**Chapitre 2 – L'analyse du football au féminin**).

2. La contraction musculaire

2.1. Les étapes de la contraction musculaire

D'un point de vue mécanique, la principale fonction des muscles est de convertir l'énergie chimique en énergie mécanique pour permettre la génération de force et de puissance, le maintien postural, et également le mouvement (Frontera and Ochala 2015). La contraction musculaire est un processus impliquant les protéines contractiles et le métabolisme de resynthèse de l'ATP. La contraction, régulée par la troponine et la tropomyosine, induit le « glissement » de l'actine sur les têtes de myosine (*théorie du glissement des filaments* : Huxley, 1957). L'union entre un filament d'actine et un filament

de myosine, pont actine-myosine, initie la libération de l'énergie stockée dans le filament de myosine sous forme d'ATP (Figure 3). L'activité de l'enzyme ATPase permettra de rompre cette molécule d'ATP par hydrolyse, et fournir l'énergie nécessaire à la création d'un nouveau pont. La resynthèse de l'ATP permettra ainsi à la myosine de se recharger en ATP. Ce renouvellement des ponts actine-myosine s'opère sous l'action du Ca^{2+} et de l'ATP. En effet, le Ca^{2+} est nécessaire pour permettre, lors de sa fixation à la troponine, d'offrir à l'actine un site de liaison à la tête de myosine. Enfin, la disponibilité de l'ATP dépendante de sa resynthèse, est déterminante et limitante dans la performance puisqu'elle est nécessaire à la libération d'énergie.

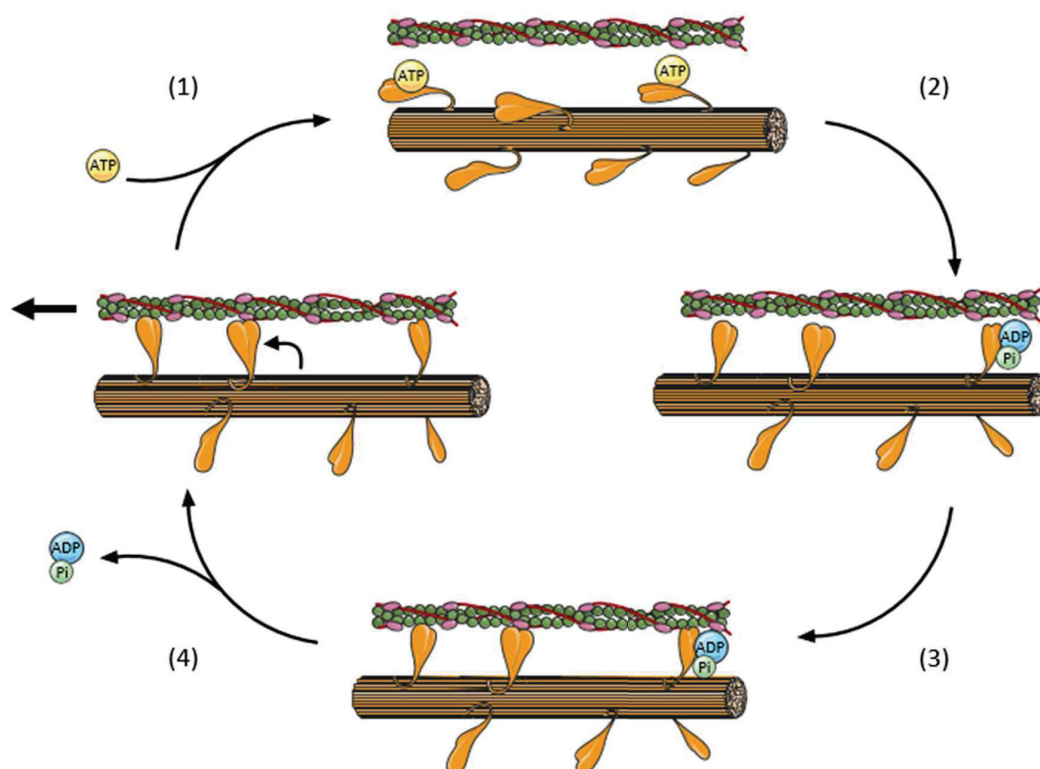


Figure 3. Cycle de la contraction musculaire

(1) La concentration intracellulaire en ATP et en Ca^{2+} permet la fixation de l'ATP et le détachement des têtes de myosine. (2) L'ATPase hydrolyse l'ATP en ADP + P_i et les têtes de myosine pivotent. (3) Les têtes de myosine se lient aux sites actifs de l'actine. (4) L'énergie libérée lors du détachement du P_i et de l'ADP entraîne la bascule des têtes et le déplacement de l'actine

La vitesse à laquelle le muscle se contracte va également influencer la force générée. La relation entre la force et la vitesse est de type hyperbolique décroissante. Ainsi, lorsque le muscle est contracté à une vitesse nulle (condition isométrique), la force générée est maximale. A l'inverse, lorsque la vitesse est trop importante, aucune force ne sera développée. La puissance est donc la résultante de la force

et de la vitesse, et s'exprime par la capacité de pouvoir générer le niveau de force le plus élevé possible dans des conditions élevées de vitesse. Cette relation force-vitesse est un élément déterminant de la contraction musculaire faisant appel à de nombreux déterminants neuromusculaires. D'autres paramètres musculaires influencent la force générée, comme l'activation par le système nerveux, l'architecture musculaire (angle de pennation), son volume, le nombre de sites d'attachement actine-myosine (Frontera and Ochala 2015).

2.2. Les déterminants structuraux

2.2.1. Typologie musculaire

Les muscles squelettiques sont composés des mêmes fibres musculaires, mais présentes dans des proportions variables. En effet, chaque muscle contient des proportions différentes de chaque type de fibres qui déterminent sa capacité à produire de la force et sa fatigabilité. Cette typologie musculaire sera dépendante du rôle que joue le muscle dans la fonction locomotrice. En effet, la diversité des fibres, ayant des propriétés physiologiques différentes, permet aux muscles une participation à des activités ayant des demandes métaboliques et mécaniques variées. Les fibres musculaires sont ainsi classifiées en fonction de leurs caractéristiques biochimiques ainsi qu'en fonction de la force qu'elles sont capables de produire.

- Les fibres, dites lentes, de type I sont des fibres possédant une vitesse de contraction lente. Elles ont une importante capacité oxydative qui s'expliquent par une concentration élevée en myoglobine, une présence d'un nombre plus important de mitochondries et de capillaires sanguins. Elles sont de ce fait, résistantes à la fatigue et permettent d'assurer un apport énergétique continu lors des activités peu intenses mais de longue durée.

- Les fibres de type IIa, sont des fibres intermédiaires, possédant des caractéristiques propres à la fois aux fibres lentes et aux fibres rapides. Ces fibres ayant un pouvoir oxydatif et glycolytique ont une certaine résistance à la fatigue (moindre que les fibres I, mais supérieure aux fibres IIb). Ces fibres permettent une continuité dans la contraction musculaire entre les fibres lentes et rapides.

- Les fibres rapides de type IIb, sont des fibres possédant une vitesse de contraction importante. Elles ont un nombre réduit de mitochondries entraînant une fatigabilité importante. Néanmoins, ces fibres possèdent un réticulum sarcoplasmique permettant une libération rapide et importante de Ca^{2+} permettant une contraction 5 à 6 fois plus rapide que les fibres lentes. Elles sont riches en glycogène et enzymes glycolytiques, et enzyme ATPase ce qui leur confère une puissance supérieure à celle des fibres de type I.

Le volume musculaire est donc déterminé par la taille des fibres musculaires et donc *in fine* par la typologie des fibres musculaire qui les composent. A cette taille est également associée une activité métabolique spécifique permettant la production d'énergie.

2.2.2. Les régimes de contraction

Le muscle squelettique possède des propriétés lui permettant de réagir à des stimuli (électriques, chimiques, hormonaux) ; de se contracter pour répondre à un besoin ; s'étirer sans se déchirer jusqu'à sa limite d'étirement ; de retrouver sa longueur initiale à la suite d'un étirement. Grâce à ces propriétés, les muscles vont ainsi permettre de se déplacer et de mobiliser les différents segments du corps. Afin de répondre à ces principes d'excitabilité, de contractibilité, d'extensibilité et d'élasticité, les muscles sont constitués d'une composante contractile (glissement des myofilaments), une composante élastique série (structures tendineuses et protéines de collagène intramusculaire), une composante élastique parallèle (située dans le tissu conjonctif et le sarcolemme entourant la cellule musculaire). Ces composantes vont être mises en jeu au cours des différents type de contraction musculaire. Le football est une activité qui nécessite des déplacements variés (accélération, changements de direction, freinages, sauts, ...) faisant appel à différents régimes de contractions. Parmi ces régimes de contraction, les sollicitations de type concentrique entraînent un rapprochement des insertions musculaires, à l'inverse les insertions s'éloignent au cours d'une contraction excentrique. Lorsque la longueur du muscle n'est pas modifiée au cours d'une contraction, le régime de contraction est le régime isométrique. Enfin, le régime pliométrique regroupe ces différents types de sollicitations. C'est lui que l'on retrouve majoritairement dans le football puisqu'il est impliqué dans les déplacements (la course entraînant une sollicitation pliométrique des muscles des membres inférieurs).

Le régime de contraction pliométrique consiste donc entre une alternance de sollicitations concentriques (raccourcissement des fibres musculaires) et excentriques (allongement des fibres musculaires). Ce cycle étirement-détente est un déterminant essentiel de la contraction musculaire en football. L'entraînement pliométrique permet ainsi d'améliorer l'explosivité des joueurs (Newton et Kraemer, 1994). En effet, les bénéfices du travail pliométrique permettent d'atteindre des niveaux de force supérieur à la force maximale volontaire, d'élever le seuil des récepteurs de Golgi, d'augmenter la sensibilité des fuseaux neuromusculaires, et d'augmenter la raideur (Cometti, 1988). En football, l'objectif de la pliométrie est de pouvoir obtenir le maximum de contraction excentrique pour la mettre au service de l'explosion concentrique (Dufour, 2004), sous réserve que le temps de contact au sol soit le plus bref possible (Young et coll., 1995b).

2.3. Les déterminants nerveux

Le cortex cérébral joue un rôle important dans le contrôle des mouvements. Le faisceau pyramidal relie le cortex cérébral moteur aux motoneurones se trouvant dans le tronc cérébral (faisceau corticobulbaire) et dans la moelle épinière (faisceau corticospinal). L'influx nerveux part du motoneurone vers le nerf périphérique (entouré d'une gaine, la myéline) qui établit une synapse avec le muscle à la jonction neuromusculaire, entraînant la libération d'acétylcholine. L'acétylcholine diffusée dans la fente synaptique se lie alors à un récepteur spécifique sur la plaque motrice qui permettra à l'influx nerveux de se propager sur le sarcolemme. Lorsque l'influx nerveux atteint le réticulum sarcoplasmique, les ions Ca^{2+} sont libérés, se lient à la troponine ce qui entraîne un changement de position de la tropomyosine qui permettra *in fine* à la contraction musculaire d'avoir lieu. La vitesse de conduction de l'influx nerveux parcourant la fibre musculaire est dépendante du type de fibre innervée. Ainsi, la vitesse de conduction de l'influx nerveux vers une fibre rapide sera plus rapide que vers une fibre lente (Goldberg et Pette, 1980). En effet c'est le motoneurone qui détermine la caractéristique de la fibre musculaire.

2.3.1. Recrutement et synchronisation des unités motrices

Les fibres musculaires sont innervées par des fibres motrices α ou motoneurones α . Chaque motoneurone innerve plusieurs fibres musculaires qu'il active de façon synchronisée. Afin que le muscle puisse produire de hauts niveaux de force, les fibres musculaires doivent être contractées simultanément. Une unité motrice est formée par un motoneurone (neurone moteur) situé dans la moelle épinière, son prolongement (axone) qui chemine dans le nerf périphérique et l'ensemble des fibres musculaires que le motoneurone innerve. Chaque axone moteur se divise en un certain nombre de ramifications, chacune d'elles innervant une seule fibre musculaire. Lors d'un mouvement, le contrôle de la force de contraction est lié au nombre d'unités motrices recrutées. Alors que le degré de finesse d'un mouvement sera déterminé par le nombre de fibres musculaires innervées par motoneurone.

2.3.2. Coordination intra-musculaire

Les exercices polyarticulaires mettent en jeu différents groupes musculaire qui ne se contractent pas tous au même moment, ni à la même intensité. Il existe une coordination entre les différents muscles (Turpin et coll., 2011) qui peut être définie comme la distribution de l'activité ou de la force entre les muscles pour produire une combinaison de moments articulaires (Prilutsky, 2000). Au niveau intra-articulaire, la coordination entre les muscles agonistes et antagonistes sert à contrôler la réalisation du mouvement (Lan et coll., 2005). Au niveau inter-articulaire, la coordination entre les articulations permet de minimiser la fatigabilité (Prilutsky et coll., 1998) et de maximaliser la performance

(Crowninshield et Brand, 1981). Ainsi, les muscles agonistes et antagonistes peuvent augmenter ou diminuer simultanément leur niveau de contraction. Le relâchement des muscles antagonistes permettra ainsi de réduire les contraintes exercées sur les muscles agonistes.

Le système musculaire est constitué d'une multitude de composants, qui ont une influence importante sur le comportement mécanique et métabolique du muscle. La morphologie et l'architecture musculaire, ainsi que la composition isoforme de la myosine jouent un rôle majeur dans les caractéristiques de force contractile du muscle évaluée comme force de contraction isométrique, concentrique et excentrique maximale, vitesse maximale de développement de la force et production d'énergie. En sport, la force musculaire est déterminante (Suchomel et coll., 2016). En effet, la force musculaire pouvant être générée par la contraction musculaire est corrélée à la puissance mécanique externe pouvant être produite par les muscles (Suchomel et coll., 2016). La capacité de générer de haut niveau de force en un temps rapide (explosivité) tout comme la puissance (Stone et coll., 2002) sont des déterminants de la performance physique.

3. Le métabolisme énergétique

Les cellules musculaires ont la capacité d'ajuster l'utilisation et la resynthèse en ATP en fonction des besoins liés à l'exercice. Le renouvellement de l'ATP peut se faire via 3 voies métaboliques qui interviennent proportionnellement en fonction de l'intensité et de la durée de l'exercice. Chaque voie métabolique, ou processus énergétique, utilise des substrats, des enzymes et des réactions chimiques qui lui sont propre. L'ensemble de ces transformations chimiques permettant de renouveler l'ATP ont lieu dans le cytoplasme des cellules musculaires et dans les mitochondries. Le maintien d'une intensité plus ou moins élevée sur un temps défini (distance ou durée) dépend de l'efficacité de ces processus énergétiques. La quantité totale d'ATP pouvant être resynthétisée en fonction des réserves en substrat définit la « capacité » de chaque voie métabolique. La vitesse de dégradation des substrats désigne quant à elle la « puissance » de ces processus énergétiques.

Les voies métaboliques sont sollicitées simultanément, mais ont des délais d'intervention différents (dépendant de la « puissance ») et des possibilités de rendement étalées dans le temps (dépendant de la « capacité »). La prédominance d'une voie métabolique au détriment des autres s'effectue en fonction de l'intensité, de la durée d'exercice, des délais d'intervention du système cardio-respiratoire. Néanmoins, cette prédominance d'une voie énergétique dans la resynthèse d'ATP, n'inhibera pas la resynthèse d'ATP via les autres filières. Pour preuve, lors d'un sprint de 10 secondes, tous les processus

métaboliques interviennent, à hauteur de 4 % pour l'ATP (réserves musculaires), 31 % pour la PCr (voie alactique du métabolisme anaérobie), 51 % pour la glycolyse (voie lactique du métabolisme anaérobie) et 14 % pour le processus aérobie (Bogdanis et coll., 1998).

Les exigences du football entraînent donc une sollicitation de l'ensemble de ces voies métaboliques (Bangsbo et coll., 2006 ; Krstrup et coll., 2006). En effet, l'énergie nécessaire pour effectuer un sprint, sur une courte distance (< 10 s) proviendra majoritairement du métabolisme anaérobie alactique, tandis que l'énergie nécessaire pour réitérer des efforts intenses, entrecoupée de temps de récupération courts, proviendra principalement du métabolisme anaérobie lactique. Enfin l'activité physique de faible intensité, qui représente la majorité des déplacements en football (Krstrup et coll., 2005), nécessitera un apport en énergie continu provenant de la sollicitation du métabolisme aérobie.

3.1. Voie anaérobie alactique

Il existe une très faible quantité d'ATP à l'intérieur de la cellule musculaire. Pour répondre à des besoins énergétiques extrêmement courts, les cellules musculaires vont donc solliciter le métabolisme anaérobie, et en premier lieu la voie alactique, afin de resynthétiser de l'ATP. En effet, le métabolisme anaérobie ne requiert pas d'O₂, il n'est donc pas dépendant du système cardio-respiratoire et possède, de ce fait, un délai d'intervention quasi nul. De plus, les cellules musculaires disposent de réserves en PCr dans leur cytosol qui sont directement utilisables. La voie anaérobie alactique va donc permettre l'hydrolyse, sous l'action d'une enzyme ; la créatine kinase (CK), de la PCr en créatine (Cr) et un phosphate inorganique (Pi), cette réaction va également libérer de l'énergie permettant de resynthétiser rapidement de l'ATP à partir de l'adénosine diphosphate (ADP) et du Pi sous l'action de la créatine phosphokinase.

Les réserves musculaires de PCr permettent de fournir une quantité importante d'énergie sur un temps extrêmement et d'autant plus court que l'exercice est supra-maximal. Ce processus permet de fournir de l'ATP pour des efforts tels que les sprints, les bondissements, et toute autre action explosive. Leur « capacité » est toutefois limitée, les réserves en PCr s'épuisant rapidement (en moins de 10 secondes pour un sprint (Sahlin, 1985)). Néanmoins, la PCr est renouvelée grâce au système aérobie, plus le système est performant, plus cette resynthèse s'effectue rapidement permettant ainsi la réitération d'efforts courts et intenses (Takahashi et coll., 1995 ; Tomlin et Wenger, 2001). Les concentrations en CK sont également déterminantes dans l'efficacité de cette filière. En effet, à la fin d'un match de football, l'altération des niveaux de CK entraînent une fatigabilité musculaire ne permettant plus de répondre aux exigences du match (Andersson et coll., 2008 ; Krstrup et coll., 2010).

3.2. Voie anaérobie lactique

Disposant d'une « puissance » moindre, mais d'une « capacité » supérieure, la voie lactique du métabolisme anaérobie permet de fournir de l'ATP grâce à une série de réactions chimiques impliquant le glycogène et le glucose. La phosphorylation du glycogène (glycogénolyse) ou du glucose (glycolyse) permet la production de molécules de glucose-6-phosphate (G6P) qui seront ensuite glycolysées pour être transformées en acide pyruvique puis en acide lactique en l'absence d'O₂. L'oxydation partielle du glucose en acide pyruvique est couplée à la réduction de transporteurs NAD⁺ en NADH et H⁺ et à la synthèse de 2 molécules d'ATP.

Les nombreuses réactions chimiques permettant la synthèse d'ATP à partir du glycogène musculaire nécessitent d'importantes concentrations en différents enzymes musculaires glycolytiques dont certaines sont limitantes (phosphofructokinase (PFK) par exemple). De plus, l'accumulation de H⁺ dans les cellules musculaires entraîne une diminution du pH ce qui peut entraîner une acidose musculaire (Robergs et coll., 2004) qui altère la liaison entre la tête de myosine et le filament d'actine, ce qui nuit *in fine* à la contraction musculaire, et donc à la production de force. Les muscles permettent de lutter dans une certaine mesure contre cette acidose via leur capacité tampon. Elle est constituée de réactions métaboliques et de composants cellulaires tels que les protéines, la carnosine et les phosphates. Ces réactions métaboliques et ces trois types de composants ont la propriété de prendre en charge des protons et donc de diminuer leur accumulation au niveau musculaire. L'entraînement peut améliorer la capacité tampon systémique et au niveau du muscle squelettique (Edge et coll. 2006).

Les capacités tampons des muscles sont déterminantes pour maintenir un haut niveau de performance dans de nombreux sports intermittents tels que le football. En effet, des biopsies musculaires effectuées au repos chez des sportifs entraînés en sport collectifs (football, hockey, basket-ball) présentent une capacité de tamponnage des ions H⁺ significativement supérieures à celles mesurées chez des sportifs entraînés en endurance (cyclisme, aviron, triathlon), et à des personnes sédentaires (Edge et coll. 2006).

3.3. Voie aérobie

Le métabolisme aérobie possède une « capacité » très importante mais une « puissance » faible. Il permet la resynthèse d'ATP grâce à l'oxydation des glucides, mais également des lipides voire des protéines pour une très faible proportion. Ces substrats, pouvant être stockés dans l'organisme (tout au moins pour les glucides et lipides), expliquent la « capacité » importante de ce processus métabolique. Contrairement au métabolisme anaérobie lactique, l'oxydation complète du glucose requiert de l'O₂. La mise en route du métabolisme aérobie tient donc compte des délais d'ajustement

cardio-respiratoires, notamment du débit cardiaque. L'ion H^+ , issu avec NADH de la réduction du transporteur NAD^+ , va se lier avec l' O_2 afin de former de l'eau (H_2O) et du dioxyde de carbone (CO_2). L'acide pyruvique issu de l'oxydation partielle du glucose se transforme alors en acétyl-coenzyme A (acétyl-CoA) dans les mitochondries, présentes en nombre important dans les cellules musculaires. Une fois dans la mitochondrie, l'acétyl-CoA entre dans le cycle de Krebs où de nombreuses réactions chimiques en série ont lieu entraînant la production de CO_2 , mais principalement la synthèse de 2 molécules d'ATP.

Les métabolites issus des réactions chimiques tels que NADH, H^+ , et $FADH_2$ produits par la glycolyse et le cycle de Krebs sont captés par des molécules protéinées présentes sur la membrane interne des mitochondries. Ces molécules constituent la chaîne respiratoire, qui est composée de nombreuses réactions en chaîne permettant le transport d'électrons et d'un flux de protons H^+ vers l'espace intermembranaire. L' O_2 se lie alors aux électrons et protons H^+ pour former de l'eau H_2O . Les protons H^+ traversent à nouveau la membrane cellulaire à travers les sphères pédonculées qui sont très riches en ATP synthases ce qui entraîne la synthèse d'une importante quantité d'ATP fluctuant suivant la nature du substrat d'origine.

L'intensité et la durée de l'exercice déterminent l'utilisation préférentielle des glucides ou des lipides pour resynthétiser l'ATP. A faible intensité (exprimée en % de la puissance aérobie), le métabolisme aérobie oxydera à la fois les glucides et les lipides. Plus l'intensité de l'exercice augmente plus les glucides seront le substrat privilégié, au détriment des lipides. A l'inverse, plus l'intensité de l'exercice diminue, plus l'oxydation des lipides sera privilégiée. Cette balance entre le taux d'utilisation de l'oxydation des lipides et des glucides pour une même intensité d'exercice peut être modifiée grâce à l'entraînement et ainsi favoriser l'utilisation plus rapide des lipides (*cross over concept*, Brooks et Mercier, 1994). En effet, le délai d'atteinte de la puissance maximale du métabolisme aérobie via l'oxydation des lipides est de 30 min, chez des sujets non entraînés, contre 2 à 3 min pour les glucides. Ainsi, l'entraînement permet une flexibilité métabolique en faveur des lipides, épargnant de ce fait les glucides et retardant l'apparition de la fatigue.

3.4. Répétition d'efforts maximaux

Un sprint très court, d'une durée inférieure à trois secondes, correspond à un effort d'intensité maximale sollicitant la filière énergétique anaérobie de manière exclusive (stocks disponibles et directement utilisable en ATP et PCr) pour la production d'ATP (Spencer et coll., 2005). Néanmoins, la durée et le nombre de sprints, ainsi que la durée de récupération influencent la contribution des systèmes énergétiques durant ce type d'actions (Balsom et coll., 1992). En effet, au cours d'un sprint long (30 s) la contribution des processus anaérobies lactiques (glycolyse) et aérobie augmente

(Medbo et coll., 1999). Ainsi, lorsque des sprints de courtes durées (6 s) sont répétés et entrecoupés de récupérations incomplètes (30 s), la part de la glycolyse anaérobie dans la contribution énergétique diminue, au profit d'une augmentation de la contribution de la voie aérobie (Bogdanis et coll., 1996 ; McGawley and Bishop, 2008). La répétition de sprints implique donc une sollicitation mixte des voies anaérobies et aérobie. La capacité de réitérer des actions intenses sera donc limitée, en partie, par la fatigue centrale mais surtout par la fatigue au niveau des muscles, *ie.* la fatigue périphérique qui s'explique par la perturbation de la resynthèse de la PCr (Mendez-Villanueva et coll., 2012), et l'accumulation de métabolites tels que les ions H⁺, ou les Pi (Bishop et coll., 2011).

En résumé, les réserves des différents substrats énergétiques et leur resynthèse, l'activité enzymatique et oxydative ainsi que la capacité tampon au niveau musculaire sont des éléments déterminants du métabolisme énergétique musculaire. En effet les qualités d'endurance ou la capacité de réitérer des sprints en football sont liés à la disponibilité et l'utilisation des substrats énergétique (Krustrup et coll., 2021). La diminution de la performance peut donc s'expliquer d'un point de vue énergétique par une incapacité des voies métaboliques à fournir l'énergie nécessaire pour répondre aux exigences d'une situation de jeu, ou une incapacité des cellules musculaires à « tamponner » les métabolites issus des différentes réactions chimiques énergétiques.

Chapitre 2 – L'analyse du football féminin

Au cours d'un match, le « jeu » impose aux joueuses d'effectuer de très nombreuses actions qui sont toutes aussi variées que complexes. Ainsi, pour se déplacer les joueuses effectuent des courses qui peuvent être linéaires, multidirectionnelles, ou encore comprenant des variations d'allure mais également des actions spécifiques réalisées en possession de la balle ou dans le but de la récupérer. En effet, ne l'oublions pas, toutes les actions et les choix réalisés par les joueuses au cours d'un match sont effectués en prenant en compte les déplacements du ballon, des partenaires mais également des adversaires, le tout dans un espace de jeu délimité. C'est dans cette richesse d'actions et de réponses motrices que résident non seulement la spécificité du football en tant que sport collectif interpénétré, mais également la difficulté de son analyse. En effet, la performance individuelle (et collective) est influencée à la fois par les qualités physiques intrinsèques des joueuses (qualités cardio-respiratoires, musculaires et métaboliques, qualités techniques et tactiques, facteurs psychologiques), mais également par de nombreux facteurs extrinsèques (adversité, enjeu, système de jeu, ...).

1. Analyse de la dimension physique en match à haut niveau

Au cours des dernières années, l'essor et le développement du football féminin se sont accompagnés de la nécessité pour les entraîneurs et préparateurs physiques de proposer des préparations qui puissent répondre aux besoins et aux exigences des matchs réitérés sur toute une saison. Dès lors, les chercheurs en science du sport se sont intéressés à analyser et quantifier ce que représentait en termes d'activité et d'efforts, un match de football féminin. Les outils et systèmes de mesure (GPS, analyse vidéo, tracking optique, cardiofréquencemètre) très utilisés chez les hommes, ont peu à peu fait leur apparition chez les femmes. Dans une récente revue systématique, des auteurs ont pu sélectionner seulement 69 études, dites qualitatives, parmi les 1562 publications s'intéressant à la quantification de l'effort en match chez la femme (Harkness-Armstrong et coll., 2022). Cette sélection s'est faite en prenant en compte le type de publication et le journal dans lequel elles ont été publiées, les objectifs clairs et définis de l'étude, le nombre et la durée des enregistrements, la validité de l'outil de mesure, la prise en compte du poste de jeu, les variables contextuelles et la présentation de résultats clairs. Les premiers travaux qui ont quantifiés et caractérisés les actions des joueuses au cours de matchs ont été réalisés à l'occasion de la Coupe du Monde féminine 1999, organisée aux États-Unis (Konstadinidou et Tsigilis, 2005 ; Tscholl et coll., 2007 ; Althoff et coll., 2010). Depuis, de nombreux matchs ont été suivis, analysés, et des études de plus en plus complètes nous sont à présent accessibles. Ainsi, durant le match, la FC moyenne relevée est de 86 ± 3 % de la FC maximale, avec des pics pouvant atteindre 98 ± 1 % (Krustrup et coll., 2005 ; Datson et coll., 2014). La FC nous permet également d'apprécier l'intensité des matchs réalisés, ce qui suggèrent une intensité élevée qui s'explique par une FC moyenne élevée. La $\dot{V}O_2$ moyenne au cours d'un match a été estimée entre 77

et 80 % de la $\dot{V}O_2\text{max}$ avec des pics pouvant aller jusqu'à 96 % $\dot{V}O_2\text{max}$ (Mohr et coll., 2004 ; Krstrup et coll., 2005). Ces données mettent en évidence que la performance en football implique une forte sollicitation cardiorespiratoire, avec des périodes où la sollicitation cardio-respiratoire est quasi-maximale (Krstrup et coll., 2005).

1.1. Diversité et variété des déplacements

Au cours d'un match, les joueuses effectuent de nombreuses actions que ce soit en phase offensive, et/ou défensive. On dénombre, individuellement, entre 1350 et 1650 changements d'activité et de déplacement au cours du match, ce qui représente un changement d'activité toutes les 4 secondes environ (Andersson et coll., 2010 ; Gabbett et Mulvey, 2008 ; Mohr et coll., 2008 ; Datson et coll., 2017). En effet, ces changements d'activité sont la conséquence des accélérations, changements de direction puisque tous les déplacements ne s'effectuent pas à la même vitesse. Prenons le cas d'une attaquante excentrée, en phase offensive au cours d'un déséquilibre de son côté, la joueuse qui sollicite la balle en profondeur ne se déplacera pas à la même vitesse que lorsqu'elle sera en position de défense, en opposition face à un bloc adverse faisant circuler la balle dans sa moitié de terrain. Pour caractériser les efforts effectués en match, il convient alors de prendre en compte différents seuils de vitesse pour quantifier les déplacements (en nombre et en distance parcourue) pouvant être effectués en marche, en course à faible vitesse, à vitesse élevée, à vitesse très élevée, et en sprints. Il existe de grandes différences, dans la littérature, au niveau des seuils de vitesse qui caractérisent les différents types de déplacement. De nombreuses études effectuées chez les femmes utilisent les mêmes seuils que ceux utilisés chez les hommes (Krstrup et coll., 2005 ; Mohr et coll., 2008 ; Andersson et coll., 2010 ; Bradley et coll., 2014 ; Datson et coll., 2014, 2017), ce qui permet ainsi de comparer hommes et femmes pour des vitesses absolues similaires (mais pour des pourcentages relatifs différents). D'autres utilisent des seuils individualisés en fonction des capacités en sprint (% de la vitesse maximale), vitesse maximale aérobie (% VMA) des joueuses (Nakamura et coll., 2017 ; Trewin et coll., 2018a ; Julian et coll., 2021), ou en fonction de seuils préétablis déjà existants dans la littérature en football féminin (Ramos et coll., 2019 ; Vescovi et Falenchuk, 2019 ; McFadden et coll., 2020 ; Griffin et coll., 2021). Chaque méthode a ses avantages : i) comparaison entre les sexes, ii) individualisation, iii) prise en compte des différences physiologiques entre les hommes et les femmes, respectivement. Il résulte de ces différences d'analyse un inconvénient majeur qui est le manque d'homogénéité dans les valeurs attribuées aux seuils, rendant la comparaison entre les études difficile.

1.2. Distance totale parcourue

La distance totale parcourue au cours d'un match de football féminin peut facilement être quantifiée grâce à l'utilisation, de plus en plus généralisée, de capteurs GPS. Leur validité et fiabilité a été

démontrée en football (Rampinini et coll., 2014). Les joueuses de champ (nous aborderons la spécificité du poste de gardien, 1.1.3) parcourent à haut niveau, en moyenne, une distance totale comprise entre 10,3 et 10,8 km (Datson et coll., 2017 ; Trewin et coll., 2018a ; Bradley et coll., 2014), ce qui en fait le sport collectif où la distance parcourue par les joueurs de champs est la plus importante. La distance parcourue en match est également un critère discriminant pour la pratique à haut niveau chez les femmes, puisque plus le niveau de pratique augmente, plus les distances parcourues sont importantes. Au cours d'un match international, les distances totales parcourues sont plus élevées (Trewin et coll., 2018a ; Ramos et coll., 2019) qu'au cours d'un match de niveau national (Vescovi et Falenchuk, 2019 ; Julian et coll., 2021). Au cours d'un match dans les catégories féminines jeunes (U14 et U16), le rapport distance parcourue sur temps de jeu est également moins important chez les adultes (Harkness-Armstrong et coll., 2021 ; Vescovi, 2014).

1.3. Distance parcourue à faible vitesse (< 15 km.h⁻¹)

La majorité de la distance parcourue au cours d'un match en football féminin s'effectue à des vitesses inférieures à 14,3 km.h⁻¹, soit à une vitesse moyenne de $99 \pm 8,3$ m/min *ie.* près de 6 km.h⁻¹ (Krustrup et coll., 2005). Les premières études rapportaient que près de 85% des déplacements au cours d'un match étaient effectués à vitesse inférieure à 15 km.h⁻¹ (Andersson et coll., 2010 ; Mohr et coll., 2008). Les études plus récentes montrent une évolution dans les déplacements réalisés en match à haut niveau, avec notamment une augmentation de la distance parcourue à vitesse élevée qui témoigne de l'évolution du football féminin comme nous pourrons le voir par la suite. Ces déplacements incluent par exemple les déplacements défensifs d'ordre tactique (couvertures, formation du bloc-équipe, remplacement des attaquantes, ...), ou encore les courses offensives d'accompagnement de la porteuse de balle (remontée du bloc équipe, écartement du bloc, ...). Les défenseuses centrales sont celles qui parcourent la plus faible distance totale au cours d'un match, quelle qu'en soit la vitesse de course (Scott et coll., 2020 ; Harkness-Armstrong et coll., 2021 ; Trewin et coll., 2018a ; Bradley et coll., 2014 ; Datson et coll., 2017 ; Panduro et coll., 2022. Winther et coll., 2022) alors que les milieux excentrées sont les joueuses qui parcourent la distance la plus élevée (Winther et coll., 2022).

1.4. Distance parcourue à vitesse élevée et en sprint (> 15 km.h⁻¹)

Après avoir déséquilibré l'équipe adverse, et ainsi avoir fait basculer le rapport de force à son avantage, l'équipe en possession du ballon se doit de garder son temps d'avance pour se présenter face au but adverse, ce qui explique l'importance des sprints réalisés à vitesse élevée. En effet, les courses effectuées à des vitesses élevées et très élevées chez les joueuses à vocation offensive ont principalement lieu lorsque leur équipe est en possession du ballon (Datson et coll., 2017). Ce qui explique également que la distance parcourue ainsi que le nombre de courses effectuées à vitesse

élevée et en sprint soit plus élevé chez ces joueuses là (Datson et coll., 2017), en comparaison aux défenseuses centrales, joueuses à vocation défensive par excellence, qui sont celles qui effectuent le moins de course de vitesse élevée (Nakamura et coll., 2017 ; Trewin et coll., 2018a ; Datson et coll., 2019).

1.4.1. Courses à vitesse élevée : 15 à 20 km.h⁻¹

Les récentes études sur l'analyse de matchs internationaux mettent en évidence une augmentation importante des déplacements réalisés à vitesse élevée, ce qui témoigne de l'évolution du « jeu ». Comme évoqué précédemment les premières études faisaient état d'une activité en course à vitesse élevée (> 15 km.h⁻¹) qui représentait 8 à 15 % de la distance totale parcourue (Davis et Brewer, 1993 ; Gabbett et Mulvey, 2008 ; Mohr et coll., 2008 ; Andersson et coll., 2010 ; Krustup et coll., 2008, 2010). Aujourd'hui ce pourcentage a doublé puisqu'au cours de matchs internationaux, la distance parcourue à vitesse élevée (> 14,3 km.h⁻¹) est de 2520 m, ce qui représente 24 % de la distance totale parcourue (Datson et coll., 2017). Ces résultats peuvent s'expliquer par les évolutions technologiques des systèmes de mesure, les rendant ainsi plus fiables.

1.4.2. Sprints : courses > 20 km.h⁻¹

Bien qu'il existe une grande disparité dans les seuils de vitesse qui caractérisent les vitesses supérieures à 20 km.h⁻¹ (vitesse très élevée : 20 à 25 km.h⁻¹ et sprints > 25 km.h⁻¹, selon les auteurs), au cours d'un match à haut niveau, les joueuses effectuent en moyenne entre 70 et 190 courses à une vitesse supérieure à 19,8 km.h⁻¹ (Mohr et coll., 2008 ; Stepinski et coll., 2020 ; McCormack et coll., 2014), ce qui représente une distance parcourue comprise entre 210 et 520 m (Datson et coll., 2014, 2017 ; Andersson et coll., 2010 ; Martínez-Lagunas et coll., 2014). Les milieux excentrées, puis les attaquantes sont donc les joueuses qui parcourent la plus grande distance à des vitesses très élevées en match (Gabbett et Mulvey, 2008 ; Mohr et coll., 2008 ; Datson et coll., 2017 ; Winther et coll., 2022) bien que la distance moyenne des distances réalisées soient différentes. En effet, les attaquantes réalisent un nombre plus important de sprints, sur des distances généralement inférieures à 15 m tandis que les milieux excentrées effectueront des sprints plus longs (> 15 m) mais moins nombreux, ce qui explique la distance similaire parcourue entre ces postes (Datson et coll., 2017). Enfin, concernant les sprints comptabilisés pour des vitesses de course dépassant 25 km.h⁻¹, les joueuses parcourent de 168 à 380 m en match (Datson et coll., 2017 ; Andersson et coll., 2010 ; Mohr et coll., 2008). La distance parcourue au cours de chaque action ne dépasse pas 5 m dans 76 % des cas et ne dépasse pas 10 m dans 95 % des situations (Datson et coll., 2017).

Ces résultats mettent en évidence l'influence du poste sur les efforts réalisés en match. Des différences sont également visibles sur la distance parcourue à vitesse élevée et en sprint en fonction du niveau

de jeu. En effet, à haut niveau les joueuses ont une activité plus élevée (28 et 24 % respectivement) comparées aux joueuses amateurs (Mohr et coll., 2008). Quel que soit le poste de jeu, la distance moyenne parcourue au cours d'un sprint est inférieure à 5 ou 10 m dans respectivement 76 à 95 % des cas (Datson et coll., 2017). Au cours de ces efforts, la vitesse maximale de course ne pouvant être atteinte sur des distances aussi courtes, ces données soulignent l'importance à haut niveau des temps de réaction et capacité d'accélération (Griffin et coll., 2020). Au cours des sprints, les milieux centrales sont les joueuses qui atteignent la vitesse maximale la moins élevée (Scott et coll., 2020, Harkness-Armstrong et coll., 2021). La vitesse maximale atteinte par les joueuses sur ces courtes distances (0 à 20 m) est également dépendante du niveau de jeu, puisque les joueuses internationales ont une vitesse maximale plus élevée que les joueuses évoluant en 1^{ère} division, et celles évoluant en 2^{nde} division (Haugen et coll., 2012)

1.4.3. Accélération et décélération

Le nombre d'accélération au cours d'un match n'est pas clairement défini ; en fonction de l'outil de mesure retenu et du seuil retenu pour caractériser l'accélération, les résultats diffèrent en effet considérablement. En considérant le seuil de 2 m.s^{-2} pour caractériser une accélération, le nombre moyen d'accélération individuelles, comptabilisées au cours d'un match, est de 13 à 80 accélération (utilisation de GPS 10 Hz : Ramos et coll., 2017 ; Jagim et coll., 2020), mais peut aller de 342 à 475 accélération (utilisation du système de tracking optique 25 Hz : Mara et coll., 2017b). L'influence du poste de jeu sur le nombre d'accélération et décélération réalisées au cours du match n'est pas clairement établi, ce qui semble être également dû à la différence des valeurs des seuils d'accélération et de décélération retenus (Harkness-Armstrong et coll., 2022). Ainsi, comme suggéré par Mara et coll. (2017a), les accélération et décélération effectuées au cours d'un match devraient être caractérisées en fonction de différents seuils permettant de différencier les intensités des accélération et décélération ou, en fonction de la vitesse initiale.

1.5. La répétition des courses à vitesse élevée

L'ensemble de ces données met en évidence la nécessité pour être performant que les joueuses, l'équipe, soient capable d'accélérer, de sprinter sur de courtes distances, très souvent inférieures à 5 m (Datson et coll., 2017), face à un adversaire en crise de temps, pour profiter d'un déséquilibre créé et induit par le jeu. La performance en football est conditionnée par la capacité à réaliser un nombre important de sprints et à parcourir une distance importante à des vitesses élevées. Mais elle est également conditionnée à la capacité de répéter des sprints sur toute la durée du match (McCormack et coll., 2014). A haut niveau, cette capacité de pouvoir alterner des efforts intenses sur de courtes

distances et des temps de récupération plus ou moins longs est une qualité physique indispensable pour être performant (Rampinini et coll., 2007 ; Chaouachi et coll., 2010 ; Gabbett et coll., 2013).

En effet, au cours d'un match, l'activité des joueuses diminue au cours de la 2^{nde} mi-temps, en comparaison avec la 1^{ère} (Gabbett et Mulvey, 2008 ; Bradley et coll., 2014 ; Vescovi et Favero, 2014 ; Ohlsson et coll., 2015 ; Panduro et coll., 2022). Cette diminution d'activité est visible quelle que soit la vitesse de la course. Ainsi, au cours de la 2^{nde} mi-temps, la distance totale parcourue est diminuée de 0,2 à 29,7 %, la distance parcourue à vitesse élevée (15 à 20 km.h⁻¹) de 0,9 à 26,6 %. La diminution de la distance parcourue en sprint (> 20 km.h⁻¹) est également importante puisqu'elle atteint jusqu'à 29,5 % (Harkness-Armstrong et coll., 2022). La distance totale parcourue à vitesse élevée n'est pas la seule variable permettant de mettre en évidence une diminution de l'activité au cours de la 2^{nde} mi-temps. En effet, la distance et le temps moyen de chaque effort réalisé à une vitesse élevée sont également diminués (Vescovi, 2014 ; Mara et coll., 2017b ; Nakamura et coll., 2017), tandis que le temps moyen entre chaque sprint augmente (Mara et coll., 2017b ; Nakamura et coll., 2017) traduisant ainsi un nombre d'actions effectuées à une vitesse élevée moins important.

Les accélérations et décélérations sont également des actions effectuées à haute intensité, et sont tout autant impactées par cet « effet mi-temps » puisque leur nombre diminue en 2^{nde} mi-temps (5,5 à 52,1 % et 2,2 à 29,5 % respectivement). Néanmoins cet effet est surtout visible chez les joueuses amateurs et tend à s'atténuer plus le niveau de compétition augmente (Mara et coll., 2017a ; Panduro et coll., 2022, Principe et coll., 2021). Cette diminution de l'activité entre les mi-temps est également visible au cours d'une même mi-temps. En effet, la distance totale parcourue au cours des 15 dernières minutes de chaque mi-temps est plus faible (4,9 à 26,2 %) que celle parcourue au cours des 15 premières (Hewitt et coll., 2014 ; Datson et coll., 2017). Cette diminution devient de plus en plus importante, plus l'intensité des courses augmente. Ainsi la distance parcourue à des vitesses élevées est diminuée de 15,5 à 41 % tandis que pour la distance parcourue en sprint, cette diminution est de 7,8 % et peut aller jusqu'à 73 %. Parallèlement à cette diminution de la distance parcourue à haute et très haute intensité, la durée entre chaque action intense est augmentée de 45,5 à 48,5 % (Mara et coll., 2017b ; Panduro et coll., 2022 ; Ramos et coll., 2017). Le nombre total d'accélérations et de décélérations diminue également au cours de la mi-temps, de 3,8 à 66,7 % en moyenne (Panduro et coll., 2022 ; Ramos et coll., 2017).

Cette diminution de l'activité des joueuses au cours du match, et au cours de chaque mi-temps, s'explique par différents paramètres qui influent directement la performance en football (Paul et coll., 2015), comme l'apparition de la fatigue ou une capacité d'entraînement insuffisante des joueuses (Andersson et coll., 2010 ; Krstrup et coll., 2005 ; Mohr et coll., 2008). Cependant, en l'état actuel des

connaissances scientifiques en football féminin, il est difficile d'expliquer avec certitude l'origine et les raisons d'une baisse d'activité et d'intensité au cours du match, et au cours des mi-temps. De nombreux facteurs peuvent expliquer cette diminution de l'activité au cours du match ; le résultat du match, les tactiques, l'état de forme physique des joueuses, la fatigue perçue, ou encore un épuisement des réserves énergétiques. Ainsi, des études ont mis en évidence une diminution significative des réserves de glycogène musculaire à la fin d'un match (Krustrup et coll., 2006), avec des diminutions transitoires des réserves en PCr après des périodes intenses d'activité au cours d'une mi-temps (Krustrup et coll., 2022). Cette incapacité à maintenir une performance nécessitant force, vitesse, qui se définit comme la fatigabilité musculaire est la première explication attribuée à la diminution de l'activité en match aussi bien chez les hommes que chez les femmes. Néanmoins, il est également probable que les différences d'activité visibles au cours d'un match puissent être en partie expliquées par une modification d'origine tactique, modifiant ainsi la nature des déplacements des joueuses (Gregson et coll., 2010).

La fatigue mentale, peut impacter la fatigabilité musculaire. En effet, au cours du match, les joueuses doivent en permanence prendre des informations sur leur position sur le terrain tout en considérant le système « ballon – partenaires – adversaires », en devant se déplacer, courir, sauter, accélérer, résister à un duel... Accomplir toutes ces tâches entraînent une fatigabilité au niveau musculaire, mais également une fatigue mentale (Krustrup et coll., 2010 ; Mujika et coll., 2009). La charge mentale qu'induit un match est en effet aussi à prendre en compte et peut expliquer la diminution des déplacements à différentes vitesses au cours du match. En effet, pour être performantes, les joueuses doivent être concentrées vis-à-vis des consignes qui leur ont été données (la plupart du temps d'ordre tactique), des déplacements à effectuer dans telle ou telle situation ou encore des caractéristiques individuelles et collectives de l'adversaire. Elles doivent également percevoir, analyser et agir en fonction des informations perçues sur le terrain, rendant les dimensions perceptive et cognitive déterminantes dans la performance. Cette intense activité cognitive entraîne une fatigue mentale qui se caractérise notamment par une altération de l'attention et de la prise de décision (Marcora et coll., 2009 ; Knicker et coll., 2011).

En 2015, Smith et coll. ont examiné l'influence d'une fatigue mentale induite sur la performance au cours d'un test intermittent. Tout en cherchant à identifier les mécanismes physiologiques et psychologiques potentiels sous-jacents à toute altération de performance, les résultats ont montré que la fatigue mentale augmentait non seulement la perception de l'effort, mais également qu'elle réduisait la distance totale parcourue et la distance parcourue à faible intensité au cours d'un test de course intermittente (Smith et coll., 2015). La fatigue mentale chez les joueuses s'explique donc par une charge cognitive importante au cours d'un match de football, mais outre la dimension perceptive

que nous venons d'aborder, la dimension comportementale joue également un rôle prépondérant. L'humeur, la motivation et l'engagement sont des traits comportementaux qui peuvent également générer de la fatigue mentale. Si les efforts réalisés par les joueuses entraînent une certaine forme de valorisation (action déterminante offensive et/ou défensive) permettant d'influer positivement sur l'issue du match, les joueuses continueront à multiplier les efforts. En effet, l'être humain continue à s'investir si ses efforts permettent d'obtenir des récompenses et résultats (Boksem et Tops, 2008). Néanmoins, au cours d'un match le score peut évoluer défavorablement, si l'objectif de remporter le match n'est plus atteignable, alors les joueuses peuvent se démotiver, et se désengager progressivement des efforts à réaliser (Boksem et Tops, 2008). Ce désengagement, cette démotivation, peut également être un élément qui explique la diminution de l'activité des joueuses en fin de seconde période (score acquis, favorablement comme défavorablement).

1.6. Les facteurs contextuels et environnementaux

Le contexte dans lequel se joue le match exerce également une influence sur l'activité physique des joueuses. De nombreuses études ont quantifié l'influence de différentes variables contextuelles (match à domicile ou à l'extérieur, semaine comportant plusieurs matchs, niveau de l'adversaire, compétition) sur la performance des joueuses (Hewitt et coll., 2014 ; McCormack et coll., 2015 ; Garcia-Unanue et coll., 2020 ; Trewin et coll., 2018b ; Vescovi et Falenchuk, 2019 ; Benjamin et coll., 2020). Ainsi de nombreuses variables entraînent une diminution de l'activité individuelle et collective au cours d'un match, telles que, l'enchaînement de 2 matchs en moins de 48 h (McCormack et coll., 2015), jouer face à une équipe adverse réputée plus faible (Hewitt et coll., 2014), jouer sur une pelouse naturelle plutôt que synthétique (Vescovi et Falenchuk, 2019), ou encore le type de compétition dans laquelle se déroule le match (amical vs. championnat, Bozzini et coll., 2020). Il convient cependant de noter que la plupart d'entre elles n'ont pris en considération qu'une seule variable au cours de leur analyse. Etant donné la nature complexe et multifactorielle des performances en football, ces données nécessitent d'être confirmées grâce à de nouvelles études, prenant en compte plusieurs variables. A l'heure actuelle, la seule étude qui prend en compte plusieurs variables contextuelles est celle de Trewin et coll. (2018b). Les auteurs ont pris en considération dans leur analyse l'enchaînement de 2 matchs en moins de 48 h, le niveau de l'équipe adverse, ainsi que les conditions météorologiques (altitude, température). Les résultats confirment les précédentes études, puisqu'affronter une opposition adverse réputée plus faible et l'enchaînement de matchs entraînent une diminution de la distance totale parcourue (Trewin et coll., 2018b). Étudiées indépendamment, les conditions météorologiques exercent également une influence sur la performance. Lorsqu'un match est joué à une altitude modérée/élevée (> 2000 m), observations basées sur l'étude de matchs sur le continent sud-américain, l'équipe à domicile est favorisée car habituée à jouer dans un tel environnement (Gore

et coll., 2008). L'altitude, même modérée (1600 m) entraînant une diminution de la distance parcourue (Aughey et coll., 2013 ; Garvican et coll., 2014), la performance physique des joueuses peut donc être altérée lorsque les matchs sont joués en altitude (Aughey et coll., 2013 ; Garvican et coll., 2014 ; Gore et coll., 2008 ; Bohner et coll., 2015). Comme évoqué précédemment, une température élevée entraîne une diminution de la distance totale parcourue (Trewin et coll., 2018b). Ce type de condition environnementale, difficile, entraîne également une altération non négligeable des performances pouvant être réalisées par des joueuses de football sur une épreuve de saut répétés (près de 9 %), et au cours d'un sprint (près de 3 %) comme cela a été démontré (Mohr et coll., 2010). Une température élevée accentue également les effets de la fatigue, la distance parcourue à vitesse élevée diminue de moitié (54 %) entre les 15 dernières minutes en comparaison aux 15 premières minutes d'un match joué par des joueurs de football professionnels espagnols dans des conditions chaudes (31 °C) (Mohr et coll., 2010). Même constat chez des joueurs semi-professionnels en Turquie, puisque la distance parcourue à des vitesses élevées en 2^{nde} mi-temps est inférieure (19 %) lorsque le match est joué dans des conditions de chaleur élevée (36 °C) en comparaison avec une chaleur modérée (34 °C) (Özgünen et coll., 2010). Bien que la différence de température, entre la chaleur élevée et modérée, ne soit que de 2 °C, les auteurs mettent également en évidence une différence de 23 % du taux d'humidité entre les 2 matchs. Si l'on considère l'indice de chaleur, combinant à la fois la température de l'air et l'humidité relative pour déterminer la température équivalente perçue par les hommes et les femmes, cette dernière était significativement différente, passant de 34 à 35 ± 1 °C pour le match effectué dans des conditions de chaleur modérée et passant de 36 à 49 ± 1 °C pour le match ayant lieu dans des conditions de chaleur élevée (Özgünen et coll., 2010). Un taux d'humidité important a donc un impact sur la distance parcourue au même titre qu'une élévation de la température sur la performance en football. Chez les femmes, le manque d'évidences scientifiques ne permet, pour l'heure, pas de dégager de conclusions générales. Néanmoins, les conditions environnementales pourraient exercer un effet similaire. En effet, au cours des entraînements d'avant-saison, lorsque la température ambiante augmente, l'intensité des courses (enregistrées avec GPS) est réduite et la charge interne perçue augmente (Austin et coll., 2021).

Il existe une forte corrélation entre la température ambiante et la distance parcourue à haute intensité, néanmoins la condition physique semble pouvoir atténuer les effets négatifs liés à une température élevée (Benjamin et coll., 2020). Ces conclusions renforcent la nécessité, pour les joueuses d'avoir une capacité aérobie élevée leur permettant de pouvoir contre-carrer de conditions météorologiques négatives. Cette donnée doit être prise en considération par l'encadrement pour proposer un entraînement adapté. En résumé, les conditions environnementales telles que la chaleur, l'humidité et l'altitude peuvent influencer la performance physique au football, les températures plus froides

(< 5 °C) n'ayant aucun effet (Carling et coll., 2011). Des facteurs tels que la pluie, le vent ou encore les conditions du terrain (dur, souple, synthétique) peuvent également influencer la performance. De nombreuses études ont ainsi déterminé l'influence des conditions environnementales et des facteurs environnementaux sur la performance physique en football féminin. Chez les femmes, la recherche s'est avant tout concentrée sur l'influence des conditions environnementales sur la performance physique plutôt que technique ou tactique. Chez les hommes, on sait que la performance technique ne semble pas être affectée par l'altitude (Nassis, 2013). Pour l'heure, le manque d'études auprès du public féminin ne nous permet pas de répondre à cette interrogation.

Nous avons vu qu'au cours d'un match les déplacements des joueuses sont nombreux et variés tant dans leur nature, intensité, fréquence mais également dans leur durée. Ils sont influencés par différents facteurs internes (fatigue, perception et mécanismes de prise de décision), mais également liés au sexe, au poste de jeu, ou encore à des facteurs contextuels (résultat, niveau de l'adversaire, condition météorologiques). Néanmoins si les joueuses se mettent en mouvement, accélèrent, freinent, c'est avant tout pour répondre toutes à un besoin faisant appel à des notions stratégiques, tactiques et pouvant amener à la réalisation d'une action spécifique, technique.

2. Analyse de la dimension technique et tactique en match à haut niveau

Les déplacements effectués au cours d'un match de football peuvent permettre aux joueuses de se rapprocher du ballon pour effectuer une action technique. Outre la dimension physique, la dimension technique et tactique est tout aussi prépondérante dans la performance en football féminin. Le football, et ses pratiques diversifiées telles que le *futsal* ou encore le *beach-soccer*, est le seul sport où les pratiquants doivent à la fois utiliser leurs membres inférieurs pour se déplacer mais également pour manipuler le ballon. Tout comme pour son analyse physique, la quantification des efforts techniques spécifiques en football féminin a pris une place importante dans la littérature.

2.1. Passes et taux de réussite

Au cours d'un match, les joueuses effectuent en moyenne 44 ± 13 passes (Andersen et coll., 2016) ; dont 11 ± 4 sur de courtes distances (< 10 m), 32 ± 12 sur des distances moyennes (10 à 40 m), 1 ± 1 sur de longues distances (> 40 m). Outre cette notion quantitative, il est intéressant de noter que le taux individuel de réussite des passes est de 68 à 72 % (Andersen et coll., 2016 ; Bradley et coll., 2014) et qu'il diminue en fonction de la distance des passes à effectuer (68 ± 11 % sur le total des passes effectuées, 70 ± 18 % sur les passes courtes, 68 ± 12 % sur les passes de moyenne distance, et 38 ± 42 % sur les passes longues ; Andersen et coll., 2016). Collectivement, les données sont similaires

puisque le taux de réussite moyen est de 70 % (276 passes réussies sur 393 tentées) au cours d'un match (Casal et coll., 2019). La majorité des passes s'effectuent principalement sur des distances inférieures à 25 m (Althoff et coll., 2010). Preuve probable de l'amélioration de la qualité des entraînements, et du développement du football féminin, le taux de réussite des passes est en progression au cours de ces dernières années passant de 67 à 80 % (Bradley et coll., 2014 ; Andersen et coll., 2016 ; Bozzini et coll., 2020 ; Garcia-Unanue et coll., 2020 ; Kubayi et Larkin, 2020 ; Casal et coll., 2019). Néanmoins, une équipe perd la balle en moyenne à 64 reprises au cours d'un match (Casal et coll., 2019). Ces pertes de balle impliquent des efforts de repositionnement, de pressing qui peuvent engendrer de la fatigue supplémentaire.

L'âge et l'expérience de la pratique sont également des paramètres individuels qui sont associés à une augmentation du nombre et du taux de réussite des passes et qui peuvent expliquer en partie cette amélioration technique (Harkness-Armstrong et coll., 2020). On peut également préciser qu'au niveau international, les équipes effectuent moins de dribbles mais surtout qu'elles effectuent un nombre plus important de passes (Gabbett et Mulvey, 2008). De plus, il a également été démontré (Kubayi et Larkin, 2020) que les équipes qui gagnent lors des matchs internationaux (données issues de la coupe du Monde 2019) sont celles qui effectuent le plus de passes (526 ± 114 contre 393 ± 108 pour l'équipe perdante) et que le taux de réussite est également supérieur (80 ± 5 % contre 74 ± 7 %). Cette modification de comportement dans l'utilisation du ballon, d'avantage basée sur la possession, démontre donc l'importance de maîtriser ce geste technique et peut expliquer l'amélioration du taux de réussite des passes au cours des dernières années. Pour compléter ces données concernant l'utilisation individuelle et collective du ballon, il a récemment été démontré au cours d'une étude réalisée auprès de catégories jeunes (U14 et U16) que les milieux centrales sont les joueuses qui touchent le plus de ballon au cours d'un match, et effectuent le plus de passes (Harkness-Armstrong et coll., 2020).

2.2. Temps de possession et touches de balle

Au cours de chaque possession individuelle de la balle, les joueuses effectuent en moyenne $2,1 \pm 0,1$ touches de balles (ce qui correspond à un enchaînement type *prise de balle, passe*) pour un temps total balle au pied de 67 ± 3 secondes sur toute la durée du match (Bradley et coll., 2014). L'expérience et le vécu sportif influencent également le temps et le nombre de possessions individuelles (Harkness-Armstrong et coll., 2020). Être en possession du ballon peut être vécu comme une source importante de stress chez certaines joueuses. En effet, le peu de temps passé individuellement en possession du ballon renforce la nécessité d'effectuer les bons choix tant l'utilisation du ballon peut être lourde de conséquence. Ainsi, l'expérience sportive leur permettra de sélectionner et de traiter plus rapidement,

et plus efficacement, les informations nécessaires à la conservation collective du ballon. Fait intéressant, en plus de la diminution de l'intensité et de la distance parcourue au cours d'un match, le temps moyen individuel de possession de la balle est également réduit passant de 34,6 secondes à 31,9 secondes (diminution de 7,8 %) chez les joueuses de haut niveau au cours de la 2nde mi-temps (Bradley et coll., 2014). Le temps de possession du ballon est également dépendant du poste, puisque ce sont les défenseuses centrales qui ont la durée totale et moyenne de possession individuelle la plus faible, tout comme le nombre de touches de balle (Harkness-Armstrong et coll., 2020). Cela se traduit par un jeu plus direct, majoritairement basé sur les relances rapides et interceptions.

2.3. Actions offensives et défensives

La quantification des actions spécifiques au cours d'un match de football féminin n'est que très peu abordée dans la littérature scientifique. Les données présentées sont générales et ne prennent pas en compte les spécificités liées au poste. Or, ces données moyennes fournissent un aperçu limité des performances techniques, étant donné que les caractéristiques techniques diffèrent entre les positions pour l'ensemble du match (Harkness-Armstrong et coll., 2020, Garcia-Unanue et coll., 2020 ; Wang et Qin, 2020). Pour preuve, d'un point de vue statistique, le nombre de frappes effectuées au cours d'un match est de $1,4 \pm 1,8$, dont $0,8 \pm 1,3$ sont cadrées (Andersen et coll., 2016). Cette valeur moyenne ne reflète pas l'influence du poste sur le nombre de frappes effectuées. En effet, les joueuses offensives et notamment les attaquantes se retrouvent en situation de frappe bien plus souvent que les défenseuses centrales. De plus, ce sont les joueuses offensives qui tentent le plus de dribbles, de centres et de tirs (Harkness-Armstrong et coll., 2020). Dès lors les futures études se doivent d'intégrer la spécificité du poste afin d'avoir un retour précis permettant de caractériser les spécificités techniques en fonction des postes.

2.3.1. *Dribbles, centres et frappes*

Des travaux récents réalisés dans le championnat féminin Espagnol *La Liga*, au cours de la saison 2016/2017 comptabilisent 1 but marqué pour 11 frappes dont 4 cadrées (Casal et coll., 2019). Dans le championnat espagnol, les équipes effectuent en moyenne 11 centres (présentant un taux de réussite de 27 %), ainsi que 33 dribbles (taux de réussite est de 51 %). La professionnalisation des championnats nationaux en Europe peut laisser penser que de nouvelles données permettront de venir confirmer les données jusqu'à présent disponibles. Individuellement, l'absence de prise en compte du poste de jeu pour caractériser les actions offensives ne permet pas de pouvoir présenter de façon représentative et spécifique les exigences techniques nécessaires à haut niveau.

2.3.2. *Interceptions, tacles et duels*

Collectivement, au cours d'un match une équipe récupère en moyenne 68 ballons (interception à la suite d'une erreur adverse, récupération à la suite d'un duel au sol ou aérien), effectue 44 tacles (taux de réussite de 59 %), et réalise 43 duels aériens dont seulement la moitié sont remportés (51 % de réussite), pour un total de 12 fautes commises (*données recueillies à l'issue de la saison 2016/2017 dans le championnat Espagnol La Liga*, Casal et coll., 2019). Enfin, individuellement (bien que peu représentatif, ne prenant pas en compte la spécificités des postes), une joueuse effectue en moyenne 8 ± 5 interceptions, réalise 6 à 21 tacles (Andersen et coll., 2016 ; Krusturp et coll., 2005) et 8 duels aériens (3 à 19, Krusturp et coll., 2005 ; Andersen et coll., 2016).

2.4. Les facteurs contextuels

L'évolution du score au cours du match ainsi que le résultat final influencent, spécifiquement, l'activité technique d'une équipe à haut niveau (Kubayi et Larkin, 2020). En effet, les équipes qui remportent les matchs effectuent deux fois plus de frappes que celles qui perdent (16 ± 6 contre 8 ± 5) et cadrent également deux fois plus leurs tentatives (6 ± 4 contre 3 ± 2). Ce sont également celles qui réussissent le plus de dribbles (52 ± 12 % contre 50 ± 13 %), et qui effectuent le plus de tentatives (39 ± 9 contre 26 ± 9). Dans l'utilisation du ballon, en plus du nombre et du taux de réussite de passes abordés précédemment, les vainqueurs sont également les équipes qui perdent le moins de ballons (81 ± 12 contre 85 ± 12) et celles qui sont capables d'effectuer le plus d'interceptions (65 ± 10 vs 59 ± 10). Parallèlement à l'influence positive du résultat sur les caractéristiques techniques offensives, les équipes qui perdent ont une activité technique comprenant majoritairement des actions défensives. Les temps de possession étant moindres, ces équipes ont donc plus d'occasions d'effectuer des actions défensives. En effet, elles effectuent un nombre plus élevé de tacles (40 ± 9 contre 35 ± 10), néanmoins la réussite est similaire quel que soit le résultat du match (62 ± 11 % pour l'équipe perdante, contre 63 ± 12 % pour l'équipe vainqueur). Les duels aériens (39 ± 11) et les fautes commises (10 ± 4) ne semblent pas être dépendants du résultat du match puisque les données sont identiques quelle que soit l'issue du match. Néanmoins, le taux de réussite des duels aériens est en faveur de l'équipe qui gagne (57 contre 43 %). Cette donnée démontre l'importance de remporter un duel, et donc de pouvoir être en mesure de prendre le dessus sur son adversaire direct. Cette notion de duel, d'affrontement, met en évidence l'importance de la composante « athlétique » au service des actions techniques.

2.5. Les facteurs tactiques

L'influence des schémas de jeu, et occupation du terrain par les joueuses sur la performance physique n'est clairement pas établie. En effet, les caractéristiques tactiques (occupation du terrain, distances entre les joueuses) ne représentent que 3 % des études (Harkness-Armstrong et coll., 2022). Les études

étant peu nombreuses sur la quantification d'un match de football féminin de haut niveau, ce faible pourcentage ne représente en réalité que 2 études (Zubillaga et coll., 2013 ; Tenga et coll., 2015).

2.6. Spécificités du poste de gardienne

Les gardiennes de but parcourent une distance totale de 4,4 à 5,6 km pendant les matchs (Scott et coll., 2020 ; Jagim et coll., 2020 ; Panduro et coll., 2022), principalement à faible intensité. Les spécificités de ce poste expliquent que la distance totale parcourue ainsi que les distances parcourues à vitesse élevée et en sprint soient plus faibles que celles parcourues par les joueuses de champ au cours d'un match (Datson et coll., 2017). Cependant, compte tenu des mouvements spécifiques induits par les possibilités techniques et tactiques liées à ce poste, l'analyse de l'activité des gardiennes de but serait plus appropriée si elle venait à prendre en considération les déplacements spécifiques (prises de balle et sorties aériennes, impulsions verticales et horizontales, passes courtes et longues) tant dans leur intensité que leur direction (White et coll., 2018). Les recherches futures devraient viser à améliorer notre connaissance, très limitée, des caractéristiques de jeu des gardiennes de but afin d'améliorer leur prise en charge à l'entraînement. Cela se traduira également par une amélioration du contenu de formation des entraîneurs spécifiques aux gardiennes de but, afin que ces derniers puissent proposer une prise en charge correspondant aux exigences spécifiques de ce poste.

Ainsi, pour résumer, les activités technique et physique au cours d'un match sont influencées par de nombreux paramètres évoqués tels que l'âge, l'expérience, le niveau de pratique, la qualité de l'opposition, la possession ou non de la balle, le type de compétition, la surface de jeu, le poste de jeu et enfin le résultat. Les futures études se doivent de caractériser l'activité technique et physique au cours du match en prenant en compte ces différents paramètres. Pour l'heure, peu d'études sont à notre disposition pour pouvoir dégager des données générales prenant en compte tous les éléments d'un match de football féminin. D'autant que la majorité de ces études sont un suivi longitudinal, d'une seule équipe au cours d'une saison. Des études prenant en compte l'intégralité des matchs joués au cours d'un même championnat sont nécessaires afin de compléter les informations actuellement disponibles en football féminin.

3. Éléments de comparaison avec le football masculin

La comparaison entre le football masculin et le football féminin donne parfois lieu à de nombreuses frasques médiatiques. Le football féminin est souvent critiqué et stéréotypé par les spectateurs, non spécialistes. Le niveau footballistique des femmes est ainsi souvent dévalorisé, voire comparé au

niveau de jeu d'adolescent garçons. En 2020, le journal libération allait même jusqu'à titrer un article en reprenant les propos de Laurence Prudhomme-Poncer (autrice de *l'Histoire du football féminin au XX^e siècle* et professeure d'EPS) : « *Le football féminin est encore considéré comme un sous-football* ». On peut ainsi se poser la question de la légitimité du parallèle entre la pratique masculine et féminine, et pourquoi un tel mépris dans la pratique des femmes. S'arrêter à ces critiques serait réducteur pour les joueuses, tant elles se sont sacrifiées pour se faire une place pour exister, et pouvoir améliorer leurs conditions de pratique, dans un sport majoritairement pratiqué par les hommes.

Pour envisager ensemble la pratique féminine et masculine, et en établir les différences ou ressemblances, il ne faut pas oublier que d'importantes différences morphologiques, physiologiques ou encore hormonales existent entre les femmes et les hommes (Ansdell et coll., 2019). Pour autant, cette différence physique n'est pas prise en compte en football, puisque c'est le seul sport où les règles, la durée du match, les dimensions du terrain, des buts et du ballon sont identiques entre les hommes et les femmes (Andersen et coll., 2012). Dès lors, la comparaison est d'autant plus « facile » puisque les conditions sont les mêmes entre les hommes et les femmes. En 2019, à l'approche de la coupe de Monde féminine organisée en France, hasard du calendrier, une publication scientifique propose d'expliquer les différences dans la pratique masculine et féminine en prenant en compte les prédispositions physiques, physiologiques, anthropométriques de ces populations (Pedersen et coll., 2019). Ainsi, il a été montré que pour les femmes, qui pratiquent sur le même terrain que les hommes, un match est bien plus éprouvant physiologiquement.

Ces chercheurs ont, de ce fait, établi un ensemble de propositions permettant de garantir une équité dans la pratique du football en prenant en compte les spécificités liées au sexe des pratiquants. Parmi leurs propositions, et afin d'adapter la pratique féminine sur les mêmes standards physiologiques que les hommes, notons une durée de match moindre (70 min), un nombre de changements plus important, une réduction des dimensions du terrain (93 x 61 m), des cages (6,78 x 2,26 m) et de la taille du ballon (taille 4). Ces propositions s'appuient sur les caractéristiques anthropométriques, physiques et physiologiques des joueuses. En effet, les joueuses possèdent une moindre force musculaire au niveau des membres inférieurs, comparativement aux hommes (Miller et coll., 1993) entraînant une vitesse de frappe moindre (Sakamoto et coll., 2014). Cette étude, novatrice, permet de mieux appréhender la difficulté de comparaison entre le football masculin et féminin. En effet, les différences anthropométriques et physiologiques entre les sexes expliquent la différence de ressources mobilisables, entraînant des niveaux de performance maximale inférieurs chez les femmes.

Au cours d'un match féminin, les joueuses parcourent une distance comprise entre 10,3 et 10,8 km (Datson et coll., 2017 ; Trewin et coll., 2018a ; Bradley et coll., 2014) et effectuent en moyenne entre

1350 et 1650 changements d'activité (Andersson et coll., 2010 ; Gabbett et Mulvey, 2008 ; Mohr et coll., 2008). Ces données, bien que très légèrement inférieures, sont similaires à celles retrouvées chez les hommes (Bangsbo, 1994 ; Mohr et coll., 2003). Autre point commun, la distance parcourue à une intensité faible à modérée (vitesse inférieure à 15 km.h⁻¹) est identique entre les hommes et les femmes et ce quel que soit le poste de jeu (Bradley et coll., 2014). De plus, on retrouve également chez les milieux de terrain une distance totale parcourue en match plus élevée que chez les autres joueurs avec les distances totales parcourues les plus faibles reportées chez les défenseurs centraux et défenseuses centrales (Bradley et coll., 2013 ; Di Salvo et coll., 2009). Enfin, les mesures cardio-respiratoires enregistrées au cours des matchs suggèrent une importante contribution du métabolisme aérobie afin de répondre aux exigences physiologiques des répétitions de courses à haute intensité (Bangsbo, 1994 ; Krstrup et coll., 2003, 2005, 2006, 2010 ; Mohr et coll., 2004). En effet, les valeurs de FC (exprimées en % de la FC max) et de la $\dot{V}O_2$ (exprimées en % de la $\dot{V}O_{2max}$) recueillies au cours de matchs masculins et féminins sont similaires, ce qui nous permet d'affirmer que les exigences physiologiques sont semblables.

Compte tenu des nombreuses divergences méthodologiques concernant la détermination des seuils de vitesses caractérisant l'activité à haute intensité, des différences sont toutefois apparentes entre les déplacements des joueurs et des joueuses dans certaines études. En effet, la distance parcourue à faible intensité (< 15km.h⁻¹) est plus faible au cours de la 2nde mi-temps chez les femmes, ce qui n'est pas observable chez les hommes. Des différences sont également observables sur l'activité physique en fonction des postes de jeu, exceptées pour les défenseurs centraux et attaquants, quelle que soit la vitesse de course. En effet, la distance parcourue au cours des déplacements effectués à une vitesse comprise entre 15 et 18 km.h⁻¹ met en évidence une tendance dans les déplacements entre les sexes où les hommes sont capables de couvrir une plus grande distance que les femmes. Pour preuve, la distance parcourue à une vitesse supérieure à 15 km.h⁻¹ chez les milieux centraux (2571 ± 210 m) est supérieure à celle parcourue par les milieux centrales (1722 ± 118 m). Cette différence de distance parcourue à vitesse élevée semble être dépendante du sexe puisque ce constat est de plus en plus vrai dès lors que la vitesse de déplacement augmente (Bradley et coll., 2014). En effet, à une vitesse supérieure à 18 km.h⁻¹, les défenseurs latéraux parcourent une plus grande distance que leurs homologues féminines (1368 ± 101 m contre 756 ± 86 m), tout comme les milieux excentrés (1456 ± 99 m contre 931 ± 78 m). Cette différence entre les sexes est également visible au cours de chaque mi-temps où l'on retrouve une distance parcourue à une vitesse supérieure à 18 km.h⁻¹ plus importante chez les hommes (Bradley et coll., 2014). Ces résultats traduisent bien une capacité des hommes de pouvoir parcourir une plus grande distance à des vitesses élevées (> 18 km.h⁻¹), puisqu'au cours de chaque mi-temps la distance parcourue est supérieure à celle parcourue par les femmes (1^{ère} mi-

temps : $599 \pm 25\text{m}$ contre $397 \pm 19\text{m}$; *2^{nde} mi-temps* : $586 \pm 27\text{m}$ contre $380 \pm 19\text{m}$), à la même intensité (Bradley et coll., 2014). De plus, nous observons une diminution de l'activité à très haute intensité ($> 18 \text{ km.h}^{-1}$) en 2^{nde} mi-temps chez les milieux de terrain (centrales et excentrées) qui n'est pas présente chez les hommes, ce qui pourrait traduire une fatigabilité accrue chez la femme pouvant être expliquée par une capacité à récupérer dépendante du sexe. La distance parcourue à vitesse élevée au cours d'un match est non seulement considérée comme un élément déterminant de la performance, mais également un indicateur du niveau de forme des joueurs et joueuses (Bradley et coll., 2011 ; Krstrup et coll., 2003, 2005).

La distance parcourue à vitesse élevée est donc dépendante du niveau de jeu, mais également du sexe bien qu'elle tende à s'atténuer (Andersson et coll., 2008, 2010). En effet, dans les premières études s'intéressant à l'analyse physique d'un match de football féminin, à niveau de compétition identique, la distance parcourue à haute intensité était 30 % inférieure chez les femmes que celle parcourue chez les hommes (Krstrup et coll., 2005 ; Mohr et coll., 2008). Néanmoins, suite à l'évolution du football féminin (connaissances scientifiques, formation des entraîneurs, professionnalisation de la pratique) les exigences physiques et physiologiques du football féminin se sont élevées (Bradley et coll., 2012), rendant cette différence entre les hommes et les femmes de moins en moins marquée. En effet, la part relative de la distance parcourue à vitesse élevée ($> 14,3 \text{ km.h}^{-1}$) est désormais similaire puisqu'elle représente respectivement 24 et 23 % de la distance totale parcourue au cours d'un match de haut niveau (Datson et coll., 2017). Néanmoins des différences existent entre les déplacements des joueurs et joueuses et sont particulièrement visibles pour des vitesses de courses très élevées ($> 21 \text{ km.h}^{-1}$).

Enfin, les temps individuels de possession du ballon sont similaires entre les hommes et les femmes (Bradley et coll., 2014), respectivement $69,6 \pm 4,1\text{s}$ et $66,5 \pm 3,4\text{s}$ et le nombre de touches de balle par possession est quant à lui identique ($2,1 \pm 0,1$). Le pourcentage de duels gagnés n'est également pas dépendant du genre puisqu'on retrouve en moyenne $55,8 \pm 3,1 \%$ des duels qui sont remportés chez les hommes et $51,3 \pm 2,0\%$ chez les femmes (Bradley et coll., 2014). En revanche, les femmes présentent un nombre de ballons perdus beaucoup plus important que les hommes ($17,4 \pm 0,8$ contre $12,6 \pm 0,6$), ce qui explique un taux de réussite des passes moindre ($71,5 \pm 1,5$ contre $79,4 \pm 1,3$). Les hommes frappent de plus loin (Kirkendall, 2007) et réalisent un nombre plus important de passes longues, ce qui peut s'expliquer par une force supérieure des membres inférieurs due aux différences morphologiques.

Des différences morphologiques, musculaires et bioénergétiques existent entre les sexes et peuvent expliquer les différences de performance physique au cours d'un match de football en fonction du sexe. Les femmes présentent en effet, des valeurs de force absolue, un taux de développement de la force, une puissance, une vitesse de sprint et d'agilité, des hauteurs de saut, ou encore une $\dot{V}O_2\text{max}$ relative inférieures aux hommes (Hannah et coll., 2012 ; Helgerud et coll., 2002 ; Mujika et coll., 2009 ; Stølen et coll., 2005). Les femmes présentent également une disponibilité différente du substrat énergétique et des modèles différents d'absorption du glucose et des acides gras par le muscle (Lundsgaard et Kiens, 2014), une activité glycolytique plus faible (Green et coll., 1984), ainsi que des taux d'oxydation des glucides et des graisses différents de ceux des hommes (Lundsgaard et Kiens, 2014 ; Esbjornsson-Liljedahl et coll., 1999). En effet, la typologie musculaire et la capillarisation diffèrent entre les hommes et les femmes, ce qui affecte le potentiel oxydatif du muscle (Steffensen et coll., 2002). Des études suggèrent que la dégradation de l'ATP des muscles squelettiques, le lactate (La) musculaire et sanguin et la réduction du glycogène dans les fibres de type I sont tous plus faibles chez les femmes que chez les hommes pendant le sprint (Esbjornsson-Liljedahl et coll., 1999, 2002 ; Jacobs et coll., 1983). Ces différences physiologiques entre les hommes et les femmes s'expliquent en partie par la présence et l'action des hormones sexuelles.

Chapitre 3 – Cycle menstruel et variations hormonales

Le cycle menstruel (CM) regroupe l'ensemble des phénomènes physiologiques survenant de façon périodique et qui préparent l'organisme de la femme à une éventuelle grossesse. Ce cycle, d'une durée moyenne de 28 jours peut varier, dans des conditions non pathologiques, entre 21 et 35 jours (Keizer et Rogol, 1990 ; Diaz et coll., 2006). Il est contrôlé par différentes hormones agissant en synergie et générant des feed-back de rétrocontrôle.

1. La physiologie du cycle menstruel

1.1. La régulation hormonale au cours du cycle menstruel

Le CM se caractérise par un minimum de deux phases distinctes d'une durée d'environ 14 jours : la phase folliculaire et la phase lutéale. La phase folliculaire débute par la période de menstruations (phase folliculaire précoce, correspond aux règles) et dure jusqu'au processus d'ovulation (phase folliculaire tardive). La phase lutéale commence après l'ovulation et dure jusqu'au début du saignement suivant (Constantini et coll., 2005). Plusieurs hormones interviennent notamment dans la régulation du cycle menstruel (Figure 4).

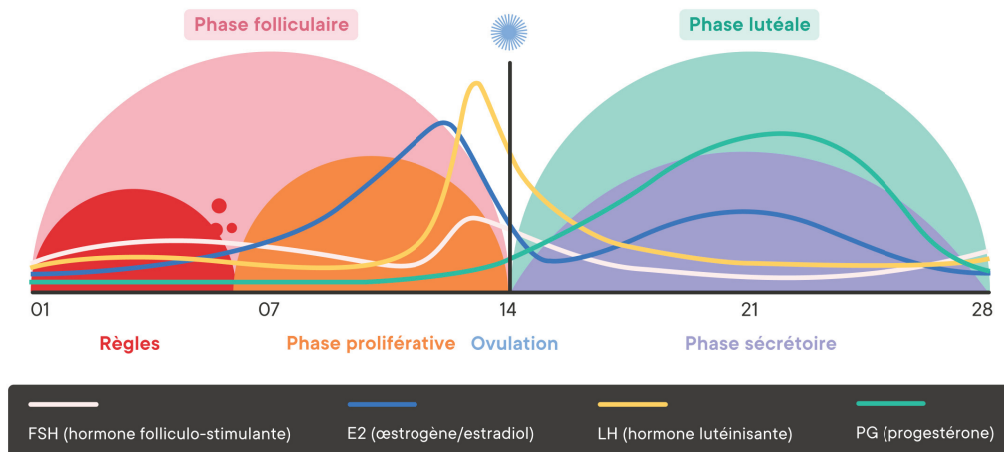


Figure 4. Variations hormonales durant le cycle menstruel (Illustration issue de l'application Clue®, <https://helloclue.com/fr>)

Le cycle menstruel est régulé par l'hypothalamus, qui produit l'hormone de libération des gonadotrophines (GnRH) pour stimuler les hormones protéiques hypophysaires, l'hormone folliculostimulante (FSH) et l'hormone lutéinisante (LH). En tant qu'hormones protéiques, la FSH et la LH ne peuvent pas pénétrer dans les cellules mais circulent librement dans le sang pour agir, suite à

leur fixation, sur leurs récepteurs membranaires. Les hormones hypophysaires (LH et FSH) agissent sur différents organes dont, majoritairement, les ovaires et glandes surrénales qui sécrètent alors à leur tour les hormones sexuelles stéroïdiennes. Les trois classes de stéroïdes sexuels sont les androgènes (testostérone, l'androstènedione, déhydroépiandrostérone); les œstrogènes (œstradiol, œstrone, œstriol) et la progestérone. Les œstrogènes sont produits par conversion enzymatique des androgènes (Simpson & Davis, 2001 ; Enea et coll., 2009) ; conversion de la testostérone pour l'œstradiol, E2, (qui est l'œstrogène le plus puissant) et conversion de l'androstènedione pour l'œstrone. Les principales hormones responsables des variations menstruelles sont l'œstradiol (17 β -estradiol, E2) et la progestérone (P4). En tant qu'hormones stéroïdiennes, l'E2 et la P4 sont des hormones liposolubles, elles ne peuvent circuler librement dans le sang. La présence d'albumine ou d'une protéine de transport spécifique à ces hormones sexuelles (*sex hormone-binding globulin*, SHBG) permet ainsi leur transport vers les cellules. Néanmoins, leurs caractéristiques leur permettent de pouvoir circuler et diffuser librement dans les cellules de l'organisme. Les récepteurs spécifiques à ces hormones se situent donc au niveau intracellulaire. La sécrétion d'E2 et P4 participe alors au contrôle rétroactif de la sécrétion de LH et FSH. Ce système de régulation est appelé axe hypothalamo-hypophyso-gonadique (HPG) (Loucks et coll., 1989 ; Brukner et Khan, 2010 ; Oosthuyse et Bosch, 2010).

Les sécrétions d'E2 et de P4 sont d'origine ovarienne, néanmoins leurs actions s'étendent à l'ensemble de l'organisme. Ainsi les fonctions principales de l'E2 sont le développement des tissus sexuels spécifiques (mammaire et muqueuse utérine), le rétrocontrôle de la sécrétion des gonadotrophines hypophysaires (LH et FSH) ainsi que la minéralisation de l'os. Il existe différentes sortes de récepteurs à l'E2 dans le corps ; les récepteurs nucléaires, les récepteurs membranaires et les récepteurs transmembranaires. Les récepteurs nucléaires des estrogènes nucléaires (ER α et ER β) sont des protéines situées à l'intérieur de la cellule, principalement dans le noyau cellulaire. Ces récepteurs fonctionnent comme des facteurs de transcription qui régulent l'expression des gènes en se liant à des séquences spécifiques d'ADN dans les régions promotrices des gènes cibles. Lorsque les estrogènes se lient aux récepteurs nucléaires, ceux-ci subissent un changement de configuration, ce qui leur permet de se lier à l'ADN et d'influencer l'expression génique, induisant ainsi des réponses cellulaires spécifiques aux estrogènes. Les récepteurs aux estrogènes membranaires sont situés à la surface de la cellule, généralement intégrés dans la membrane cellulaire. Ces récepteurs transmettent des signaux à l'intérieur de la cellule en activant des voies de signalisation intracellulaire lorsqu'ils sont stimulés par des estrogènes. Les cascades de signalisation entraînent des réponses cellulaires spécifiques, bien que souvent plus rapides que celles induites par les récepteurs nucléaires. Enfin, récemment un troisième type de récepteur transmembranaire des œstrogènes a été découvert. De la famille

des récepteurs couplés aux protéines G, le récepteur GPR30 semble particulièrement abondant et actif au niveau du système nerveux central.

L'ER α joue un rôle important sur la glande mammaire et l'utérus, ainsi que sur la préservation de l'homéostasie squelettique et la régulation du métabolisme énergétique. L'ER β semble avoir un effet important sur les systèmes nerveux central et immunitaire, et contrecarre la prolifération cellulaire favorisée par ER α dans des tissus tels que le sein et l'utérus (Dahlman-Wright et coll., 2006 ; Halding et coll., 2007). Le rôle principal de P4 est de transformer et préparer la muqueuse utérine en vue d'une éventuelle nidification de l'ovule fécondé mais elle joue également un rôle dans le rétrocontrôle (négatif) de l'axe HPG. Toutefois, P4 influe également sur le métabolisme osseux et énergétique, majoritairement en raison de son action E2-antagoniste (Oosthuyse et Bosch, 2010).

1.2. Les phases du cycle menstruel

Si le cycle menstruel peut se caractériser par deux phases principales (folliculaire et la phase lutéale, Figure 4), il peut être aussi subdivisé en différentes autres phases témoignant du rapport E2/P4. *In fine*, le cycle menstruel pourrait être sous-découpé en 6 phases que sont : la phase folliculaire précoce (menstruations), la phase folliculaire tardive (pré-ovulatoire), la phase ovulatoire, la phase lutéale précoce, la phase mi-lutéale et la phase lutéale tardive (préménstruelle). Les fluctuations des hormones sexuelles (FSH, LH, E2, P4) présentes au cours de chacune des phases sont distinctes et permettent de confirmer les phases du cycle (Figure 5).

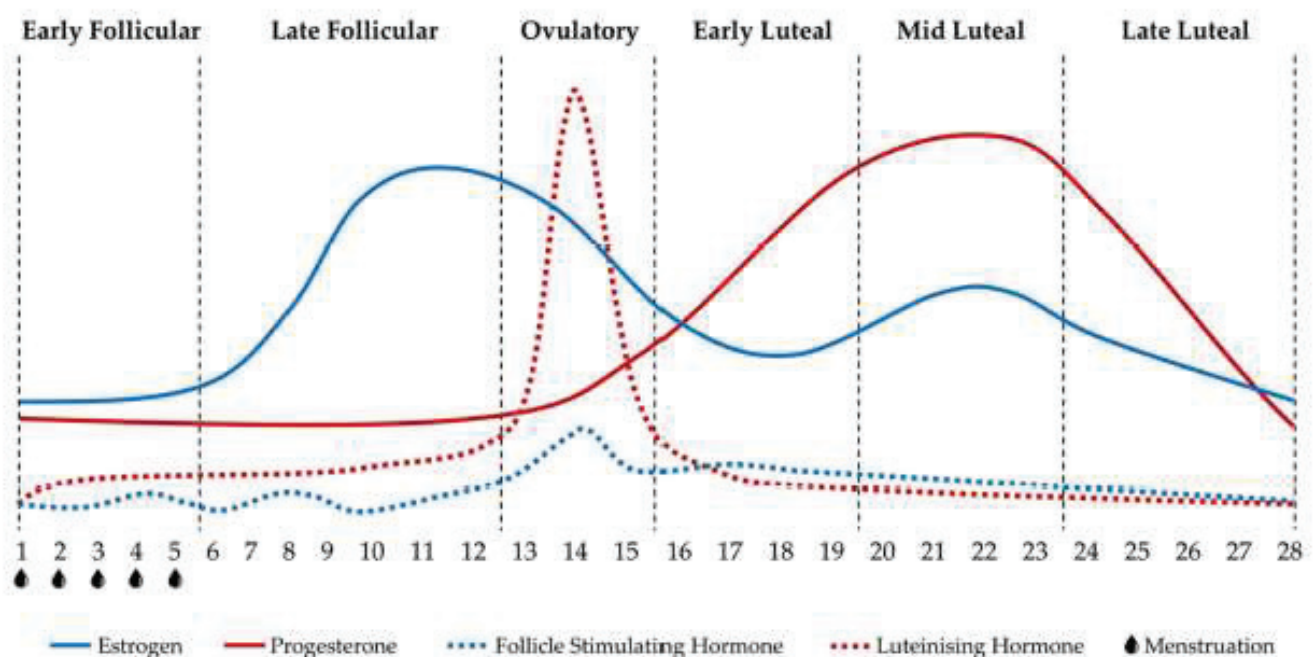


Figure 5. Les différentes phases du cycle menstruel (Carmichael et coll., 2021)

La phase folliculaire précoce (FP) débute par la période de menstruations (jour 1, J1), qui dure entre 4 à 6 jours ; au cours de cette phase les concentrations des hormones sexuelles (LH, FSH, E2 et P4) sont faibles et stables. La phase folliculaire se poursuit, les concentrations en P4, LH et FSH demeurent stables et faibles, tandis que la concentration en E2 augmente jusqu'à atteindre un pic qui caractérise la phase folliculaire tardive (FT). Ce pic en E2 a un effet de rétroaction négatif sur la sécrétion de FSH et un effet de rétroaction positif sur la sécrétion de LH par l'hypophyse. La stimulation de la sécrétion en GnRH entraîne ainsi une augmentation brutale de LH qui déclenche l'ovulation, au cours de laquelle un follicule mature se rompt et libère l'ovule dans l'utérus. Les concentrations en LH et FSH chutent alors, la concentration en P4 augmente progressivement tandis que la concentration en E2 diminue pendant plusieurs jours. La phase lutéale précoce (LP) débute à partir de l'ovulation, le follicule rompu devient le corps jaune, et sécrète de la P4 qui augmente considérablement tandis que la concentration en E2, faible, se stabilise. Durant la phase mi-lutéale (ML) la concentration en P4 atteint un pic puis se stabilise. Au même moment, la concentration en E2 augmente à nouveau pour atteindre un deuxième pic, plus faible que le premier, pour préparer l'endomètre à l'implantation d'un ovule fécondé. En l'absence de fécondation, le corps jaune se dégradera, provoquant une baisse brutale de la P4 et d'E2 au cours de la phase lutéale tardive (LT), la muqueuse utérine se détache alors, puis s'élimine au cours de la phase de menstruations qui marque le début du cycle menstruel suivant (Patricio et Sergio, 2019).

Ce modèle du cycle menstruel, et de ces différentes phases se base sur un cycle, non pathologique d'une durée de 28 jours. Cependant, le moment de l'ovulation, et donc des différentes phases, peut être très variable (Soumpasis et coll., 2020). Cette variabilité de la période d'ovulation est la raison pour laquelle des mesures telles que les tests urinaires de LH et des dosages sanguins hormonaux de la concentration en E2 et P4 sont utilisées, et nécessaires, pour identifier avec précision les phases du cycle menstruel (de Jonge et coll., 2019 ; Elliott-Sale et coll., 2020). Compte tenu de l'influence potentielle des hormones ovariennes sur plusieurs systèmes physiologiques, il est légitime de penser que les résultats hétérogènes observés parmi les études sur l'influence du cycle menstruel sur la performance, s'expliquent en partie par des divergences méthodologiques (McNulty et coll., 2020 ; Hackney et Constantini, 2020). Dans la recherche, la nomenclature se doit ainsi d'être rigoureuse, dans la caractérisation des différentes phases du cycle menstruel. En effet, chaque phase présente un profil hormonal distinct où le rapport E2/P4 diffère, entraînant ainsi l'influence majorée de l'une d'elle.

2. Effets des hormones sexuelles sur les grandes fonctions physiologiques

En plus de leurs actions dans la régulation de la fonction reproductrice, les hormones sexuelles (E2 et P4) sont également connues pour agir sur d'autres tissus. En effet, il a été montré que les stéroïdes

ovariens ciblent un certain nombre de tissus tels que les tissus épithéliaux (Boss et coll., 2014), conjonctifs (Chidi-Ogbolu et Baar, 2019), musculaires, tendineux et nerveux (Wierman et coll., 2007 ; Sipilä et coll., 2015 ; Collins et coll., 2019). Ils sont également impliqués dans le métabolisme énergétique (Hackney et coll., 1994 ; Isacco et coll., 2012) permettant la régulation de l'oxydation des lipides, des glucides et des protéines. Enfin les hormones sexuelles agissent sur la fonction ventilatoire (Macnutt et coll., 2012), la cognition (Boss et coll., 2014), la régulation de la température interne corporelle (de Jonge et coll., 2012) ou encore l'équilibre hydrominéral (Stachenfeld, 2008). Ainsi, la variation des concentrations plasmatiques en E2 et P4 au cours du cycle menstruel est susceptible d'influencer les mécanismes qui contrôlent et régulent les fonctions physiologiques (Elliott-Sale et coll., 2021) et par là-même peuvent moduler les qualités physiques des sportives et affecter la performance (Reilly, 2000 ; Oosthuysen et Bosch, 2010 ; Sims et Heather, 2018).

2.1. Influence des hormones sexuelles sur la composition corporelle

Durant la phase lutéale, les concentrations élevées en E2 et P4 entraînent, une augmentation de la concentration en aldostérone, qui stimule par rétroaction le système rénine-angiotensine (Szmuiłowicz et coll., 2006). L'augmentation d'aldostérone va ainsi entraîner une augmentation de la sécrétion d'hormone anti-diurétique (ADH ou vasopressine) entraînant une altération du rapport potassium/sodium à l'origine d'une rétention des fluides, favorisant potentiellement une augmentation de la masse corporelle (Reilly, 2000). D'autres études ont également montré que la composition corporelle peut être modulée au cours du cycle. Chez les sportives ou non sportives, la masse corporelle incluant la masse hydrique peut significativement augmenter entre la phase folliculaire et la phase lutéale du cycle (Stachoń, 2016 ; McKee et Cameron, 1997 ; Fruzzetti et coll., 2007). L'augmentation de la masse corporelle au cours de la phase lutéale pourrait être liée à une élévation de la rétention des fluides sous l'augmentation de l'ADH et/ou une diminution de la production d'insuline liée à une concentration élevée de P4. Cette régulation de l'insuline est de plus susceptible de stimuler l'appétit et donc la consommation alimentaire (Dye et Blundell, 1997 ; Akturk et coll., 2013). La masse corporelle étant un facteur déterminant dans la performance sportive, toute augmentation de sa valeur peut être un désavantage dans les activités nécessitant de soulever son propre poids (course, saut, ...) (Stachenfeld, 2008). Ainsi, l'augmentation de la masse corporelle non protéique est généralement associée à une altération des performances d'endurance aérobie (Maciejczyk et coll., 2014) mais elle peut aussi être associée à de moindres performances de type anaérobie (Maciejczyk et coll., 2015). Néanmoins, l'influence du cycle menstruel sur la composition corporelle reste encore débattue puisque différentes études n'ont pu quant à elles établir des variations significatives de masse grasse ou masse totale au cours du cycle (Lebrun et coll., 1995 ; Julian et coll., 2017 ; Rael et coll., 2020). Le caractère multifactoriel d'une prise de poids étant complexe,

l'effet potentiel des hormones sexuelles sur la composition corporelle au cours d'un cycle est donc probablement sujet-dépendant et devrait faire l'objet d'un suivi personnalisé dans le monde sportif.

2.2. Influence des hormones sexuelles sur la fonction neuromusculaire

Les récepteurs $ER\alpha$ et $ER\beta$ sont présents dans tous les tissus musculo-squelettiques, y compris les muscles (Barros et Gustafsson, 2011 ; Luo et Kim, 2016), les os (Cui et coll., 2013), les ligaments (Liu et coll., 1996) et les tendons (Bridgeman et coll., 2010). De plus, ces récepteurs sont également présents au niveau des myoblastes et des myotubes des muscles squelettiques, ce qui implique que le muscle squelettique est particulièrement sensible aux œstrogènes (Kahlert et coll., 1997 ; McClung et coll., 2006). Une concentration élevée en E2 permet de protéger le muscle cardiaque (Campos et coll., 2014 ; Strehlow et coll., 2003). Cette activité anti-oxydante reste à démontrer au niveau du muscle strié squelettique. De plus, P4 exerce également une influence sur le système musculo-squelettique (Chabbert-Buffeta et coll., 2000) puisqu'elle joue un rôle neuroprotecteur au niveau des gaines de myéline (Schumacher et coll., 2014).

2.2.1. Influence hormonale sur les déterminants structuraux

L'étude animale, auprès de souris, a également permis de mettre en lumière le rôle de l'E2 sur la fonction musculaire. Il a été montré que l'E2 régule la masse du muscle squelettique chez le rat (Kobori et Yamakuro, 1889 ; McClung et coll., 2006), la force musculaire (Kitajima et Ono, 2016) et a également des effets positifs sur la fonction contractile musculaire (Enns et Tiidus, 2008 ; Carson et Manolagas, 2015). En effet, 24 semaines de carence en E2 (ovariectomie) entraînent une diminution de 10 % de la force musculaire ce qui correspond à une diminution de 18 % de la surface de section transversale des fibres musculaires (Kitajima et Ono, 2016). Au-delà de l'altération structurelle, la capacité de récupération musculaire est également diminuée (McClung et coll., 2006). En effet, 14 jours après le test, les souris ovariectomisées ont une reconstruction musculaire limitée et un nombre de fibres musculaires blessées plus important. Un apport en E2 exogène permet de retrouver des paramètres musculaires initiaux. Ces données suggèrent qu'en l'absence E2, le muscle est plus sujet aux blessures, dues à une récupération musculaire altérée (McClung et coll., 2006). Au niveau structurel, Lowe et coll. (2001) ont quantifié, chez des rats, les états de liaisons entre les fibres de myosine et d'actine lors d'une contraction musculaire en fonction de l'âge (spectroscopie par résonance paramagnétique électronique). Les auteurs ont observé que la fraction des têtes de myosine dans l'état structurel à liaison forte pendant la contraction diminuait de 30 % avec l'âge (Lowe et coll., 2001), ce qui peut expliquer la diminution de la force musculaire observable avec l'âge. Chez des femelles, l'ovariectomie entraînant l'absence d'E2, assimilable à la ménopause, induit une diminution de la myosine à forte liaison qui explique une réduction de la force. De plus, des apports exogènes en E2 inhibent ces

réductions chez les femelles (Moran et coll., 2007). Ces résultats permettent ainsi de confirmer que l'E2 est impliqué dans la génération de force au niveau des fibres musculaires, et notamment via l'activité de la myosine. De plus, les teneurs totales en protéines d'actine et de myosine des fibres musculaires ne sont pas différentes entre les souris ovariectomisées et les souris saines, ce qui prouve que la quantité d'éléments contractiles n'est pas affectée par le statut hormonal, mais que l'efficacité de la contraction est affectée. Le cycle de la myosine entre les états de liaison forte et faible dépend de l'hydrolyse de l'ATP par la tête de myosine. L'activité ATPase myofibrillaire reflète donc la fonction de la myosine. Dans les myofibrilles cardiaques, l'activité maximale de l'ATPase myofibrillaire est diminuée par l'ovariectomie et restaurée par le remplacement de l'estradiol (Wattanapernpool et coll., 2000). Ces résultats suggèrent que, chez la souris, l'ATPase est associée positivement à la concentration en E2. Enfin, l'absence d'E2 induit une hypersensibilité au Ca^{2+} dans les myofibrilles cardiaques. Hypersensibilité qui disparaît dès lors où l'apport en E2 est rétabli (Wattanapernpool et coll., 2000).

Cependant, chez la femme, l'effet de l'E2 sur l'activité musculaire n'a pas été aussi clairement défini, car les changements de concentration en E2 sont cycliques, d'une durée plus courte ou dépendant de l'âge (Enns et Tiidus, 2010). Néanmoins, l'E2 est également connu pour avoir un effet anabolisant (Carson & Manolagas, 2015). Ainsi, les valeurs maximales de force et de puissance seraient atteintes au cours de la phase folliculaire tardive, lorsque la concentration en P4 est faible et celle en E2 élevée. Ainsi, une augmentation de la contraction musculaire volontaire maximale est en effet visible au cours de la phase folliculaire (Phillips et coll., 1996 ; Sarwar et coll., 1996 ; Tenan et coll., 2016).

L'E2 stimule également la synthèse d'hormone de croissance (hGH) (Bernardes & Radomski, 1998 ; Leung et coll., 2004) permettant ainsi la régénération de la masse musculaire squelettique (McClung et coll., 2006). La progestérone a l'effet inverse, étant considérée comme catabolique (Reis et coll., 1995). De nombreuses études cherchant à comprendre le rôle de l'E2 sur la fonction musculaire s'appuient sur les différences hormonales liées au sexe, ce qui ne permet pas clairement de définir le rôle de l'E2 sur la fonction musculaire de la femme. Durant la phase lutéale, chez des femmes euménorrhéiques, des études ont mis en évidence une oxydation plus importante des acides aminés et une dégradation accentuée des protéines par rapport à la phase folliculaire aussi bien au repos (Kriengsinyos et coll., 2004 ; Lariviere et coll., 1994) qu'à l'exercice (Bailey et coll., 2000 ; Lamont et coll., 1987). Ainsi, il a été suggéré que les concentrations élevées en P4 au cours de la phase lutéale augmentent le catabolisme protéique, tandis que les concentrations élevées en E2 ont un pouvoir anabolisant sur le muscle (Oosthuyse et Bosch, 2010). Néanmoins la synthèse des protéines myofibrillaires semble inchangée entre la phase folliculaire et lutéale du cycle (Ferrell et coll., 2005). Cependant, il est important de noter que, comme dans un grand nombre d'études, les phases au cours

desquelles ont eu lieu les sessions expérimentales ne sont pas représentatives de l'influence hormonale. En effet, les auteurs ont retenu la phase folliculaire comme une phase où la concentration est faible en E2 et en P4, soit la phase folliculaire précoce. La phase lutéale est retenue pour une concentration modérée en E2 et élevée en P4, soit la phase mi-lutéale. Entre ces 2 phases, la concentration en E2 a doublé, alors que celle en P4 est multipliée par 40. La P4 ayant des effets antagonistes à l'E2, les mesures sont effectuées *in fine* dans une phase avec de faibles concentrations en E2 et une phase où l'effet de P4 vient inhiber celui de l'E2. Ainsi, l'influence de l'E2 ne peut être définie dans les conditions hormonales présentes de cette étude.

Le cycle étirement-détente semble être modifié durant la phase ovulatoire, notamment en raison d'une diminution concomitante de la raideur musculaire et tendineuse (Eiling et coll., 2007 ; Ham et coll., 2020), d'une altération de la capacité de production de force (Bell et coll., 2011) ou encore d'une baisse du réflexe d'étirement (Casey et coll., 2014), toutes ces variations étant attribuées à la présence importante des œstrogènes. Bien que peu nombreuses, les études concernant l'efficacité du cycle étirement-détente sur l'articulation de la cheville semblent montrer une influence négative de la période ovulatoire sur cette qualité (Yim et coll., 2018).

En l'absence d'E2, chez les femmes ménopausées, le traitement hormonal de substitution (THS) permet d'observer les effets de l'E2. Le THS, et en particulier le remplacement des œstrogènes permet de lutter contre la diminution de la force musculaire (Greising et coll., 2009). Chez les femmes ménopausées, des taux plus élevés de synthèse et de dégradation des protéines musculaires ont été observés par rapport aux femmes préménopausées (Smith et coll., 2014). En dépend de taux supérieurs de renouvellement des protéines, les femmes ménopausées présentent une diminution rapide de la masse et de la force musculaire (Hansen et Kjaer, 2014). La masse musculaire dépend de l'équilibre entre la synthèse et la dégradation des protéines musculaires. La diminution rapide de la masse musculaire après la ménopause laisse penser que l'augmentation du taux de synthèse des protéines est contrecarrée par une augmentation plus importante de la dégradation des protéines, ou que les protéines synthétisées ne sont pas des protéines myofibrillaires mais plutôt des protéines favorisant la réparation des blessures. Les femmes ménopausées prenant un THS ont une augmentation de la synthèse de protéines de myofibrilles à la suite d'un entraînement en musculation (Dieli-Conwright et coll., 2009), augmentation qui n'est pas visible chez les femmes ménopausées sans THS (Pöllänen et coll., 2010). La ménopause s'accompagne d'une chute de la sécrétion d'hormones sexuelles entraînant une diminution de la masse musculaire. La prise d'un THS, bien que constitué d'E2 synthétisé, permet aux utilisatrices de lutter contre la perte de force qui accompagne la fonte musculaire. Bien que les mécanismes grâce auxquels la force musculaire est maintenue ne sont pas clairement définis, la présence d'E2 semble avoir un effet sur la fonction musculaire.

2.2.2. Influence hormonale sur les déterminants nerveux

L'E2 est également connu pour avoir un effet neuro-excitateur pouvant être inhibé en présence de P4 (Slauterbeck et coll., 2002). Ces effets neuro-excitateurs et inhibiteurs mettent en évidence l'action opposée des hormones sexuelles sur la stimulation nerveuse au niveau musculaire entraînant ainsi une altération potentielle de la contraction musculaire (Slauterbeck et coll., 2002 ; Pallavi et coll., 2017 ; Gordon et coll., 2013). Néanmoins, une vitesse de recrutement des unités motrices plus importante a été relevée, dans le vaste médial et latéral, au cours de la phase lutéale en comparaison avec la phase folliculaire précoce (Tenan et coll., 2013).

Bien que les auteurs n'aient pas pris en compte la phase folliculaire tardive où les concentrations en E2 sont maximales, ces résultats suggèrent que les concentrations faibles en hormones sexuelles pourrait être associées à une diminution de l'activation musculaire. La production rapide de force nécessaire pour effectuer des mouvements explosifs étant déterminée en partie par la vitesse de recrutement des unités motrices (Del Vecchio et coll., 2019), cela suggère une altération potentielle de la contraction maximale au cours de la phase folliculaire précoce.

2.3. Influence des hormones sexuelles sur la fonction métabolique

Le rôle anabolisant sur le muscle squelettique associé à l'E2 (Ziomkiewicz et coll., 2008) s'accompagne également d'un rôle déterminant dans l'utilisation et la mobilisation des substrats énergétiques. En effet, l'E2 augmente la capacité de stockage du glycogène musculaire, la disponibilité des acides gras libres et l'utilisation des voies oxydatives (Hatta et coll., 1988). Néanmoins, certains effets de l'E2 sont inhibés par ceux de la P4 (Candolfi et coll., 2005), notamment au cours de la phase mi-lutéale où les concentrations élevées en E2 et P4 entraînent une forte interaction des influences respectives de l'E2 et P4 (Mas et coll., 2015). De ce fait, D'Eon et coll. (2002) ont proposé que les réponses métaboliques induites par l'E2 ne pourront être mises en évidence que lorsque le rapport E2/P4 est suffisamment élevé afin que l'action de l'E2 ne soit pas contrecarrée par la concentration en P4 et ses effets anti-oestrogéniques (Campbell et Febbraio, 2001, 2002 ; Hatta et coll., 1988).

2.3.1. Métabolisme des glucides

Des études chez les rongeurs et les humains suggèrent que les œstrogènes jouent un rôle important dans la régulation du métabolisme de ce substrat au repos et pendant l'exercice d'endurance (Tarnopolsky 2008 ; Vieira-Potter et coll., 2015 ; Maher et coll., 2010 ; Sladek, 1974 ; Kendrick et coll., 1987). Dans un modèle animal, il a été démontré que l'E2 possède un certain nombre d'effets métaboliques sur le muscle squelettique. Lorsque les souris femelles ne produisent plus d'E2 (ovariectomie), la fonction mitochondriale est altérée tout comme la fonction musculaire puisque les

niveaux de protéines antioxydantes telles que la glutathion peroxydase, la catalase et la superoxyde dismutase sont altérés (Baltgalvis et coll., 2010) ainsi qu'une diminution de la sensibilité à l'insuline (Torres et coll., 2018). Ces effets sont dus à la perte d'E2, car le rétablissement des niveaux normaux d'E2 rétablit l'oxydo-réduction cellulaire et l'homéostasie du glucose dans le muscle squelettique (Spangenburg et coll., 2012 ; Camporez et coll., 2013 ; Torres et coll., 2018). De plus, les rats supplémentés en E2 présentent une activité plus élevée de lipoprotéine lipase (LPL) (Ellis et coll., 1994), de carnitine palmitoyltransférase I (CPT-I) et de β -hydroxyacyl-CoA déshydrogénase à chaîne courte (β -HAD) (Campbell et Febbraio, 2001) dans le muscle squelettique. Chez ces rongeurs, l'utilisation du glycogène hépatique est réduite par rapport à ceux non supplémentés (Campbell et Febbraio, 2001 ; Kendrick et coll., 1987 ; Hatta et coll., 1988).

Un certain nombre d'études ont montré que les taux d'apparition (déterminé par la production endogène de glucose) et de disparition (dépendant de l'absorption) de glucose à jeun pendant l'exercice sont atténués par les THS à l'E2 (Ruby et coll., 1997 ; Carter et coll., 2001 ; D'Eon et coll., 2002 ; Devries et coll., 2005). Ce constat est également observable, dans le cas d'un cycle menstruel physiologique lorsque la concentration en E2 est élevée. En effet, en comparaison avec la phase folliculaire précoce, au cours de la phase mi-lutéale les taux d'apparition et d'absorption de glucose pendant l'exercice sont également atténués (Campbell et coll., 2001 ; Zderic et coll., 2001 ; Devries et coll., 2006). Ainsi, la diminution de l'utilisation du glucose au cours de la phase lutéale est probablement un effet associé aux E2 que la P4 n'antagonise pas mais peut au contraire potentialiser (D'Eon et coll., 2002). Cependant, l'effet de l'E2 sur la production de glucose hépatique semble être dépendante de l'intensité de l'exercice (Horton et coll., 2002). En effet, lors d'un exercice réalisé à une intensité de 50 % de $\dot{V}O_2\text{max}$, la concentration sanguine de glucose était plus faible au cours de la phase mi-lutéale qu'au cours de la phase folliculaire précoce. Cependant, aucune différence n'est visible pour un exercice effectué à une intensité de 42 % de $\dot{V}O_2\text{max}$ (Zderic et coll., 2001). Ainsi, lorsque la demande de production de glucose est diminuée au profit de l'augmentation de l'utilisation des lipides dans le cas d'un exercice à intensité faible, les variations hormonales n'ont pas d'effet significatif dans la cinétique du glucose. En effet, pour des sujets effectuant un exercice à une intensité relative à 70 % de la $\dot{V}O_2\text{max}$, la production endogène de glucose est significativement différente entre la phase folliculaire précoce et la phase mi-lutéale, ce qui confirme l'hypothèse de l'importance de l'intensité de l'exercice sur les modifications de la cinétique du glucose sous l'effet des variations hormonales. L'emploi de biopsie musculaire confirme néanmoins l'influence des variations hormonales sur l'utilisation des glucides indépendamment de l'intensité de l'exercice. Au cours de la phase lutéale, les biopsies musculaires effectuées au repos présentent une concentration en glucides

plus élevée, suggérant un stockage plus important qu'au cours de la phase folliculaire (Nicklas et coll., 1989 ; Hackney, 1990 ; McLay et coll., 2007).

De plus, une carence en E2 est associée à une résistance à l'insuline (Latour et coll., 2001) et à des concentrations d'insuline plus élevées (D'Eon et coll., 2002). D'autres études ont également signalé une augmentation de la sensibilité à l'insuline en présence d'E2 mais ne signalent souvent aucun changement dans la sensibilité à l'insuline après une ingestion importante de glucose (Hansen et coll., 1996 ; Latour et coll., 2001). L'augmentation de la P4 entraîne une diminution de la teneur en transporteur de glucose insulino-sensible (GLUT4) dans les tissus insulino-sensibles (Campbell et Febbraio, 2002) ainsi que de la résistance à l'insuline (Kalkhoff, 1982 ; Elkind Hirsch et coll., 1993 ; Ezenwaka et coll., 1993). Par conséquent, la P4 vient contrecarrer les effets de l'E2 et probablement le stockage du glycogène.

Néanmoins, la recherche animale constate systématiquement que le THS à l'E2 entraîne une économie de glycogène des muscles squelettiques au repos mais également pendant l'exercice (Kendrick et coll., 1987 ; Campbell et Febbraio, 2002 ; Rooney et coll., 1993). En effet, l'E2 permet d'augmenter la disponibilité du glucose et, en outre, l'absorption dans les fibres musculaires spécifiquement de type I pendant les périodes de demande (Campbell et Febbraio, 2002). Compte tenu de l'hétérogénéité des résultats sur les réserves de glycogène musculaire au repos, d'autres études sont nécessaires chez la femme pour clarifier précisément si les hormones ovariennes modifient les réserves de glycogène musculaire au repos et à l'exercice. Bien que les chercheurs qui étudient les comparaisons des phases menstruelles aient étudié de manière approfondie le métabolisme des glucides pendant l'exercice, les mesures de traceurs isotopiques du taux d'oxydation du glucose plasmatique font toujours défaut.

Les études suggèrent donc que l'E2 et la P4 ont divers effets sur le métabolisme des glucides. L'E2 favorise la sensibilité à l'insuline et peut-être un plus grand stockage du glycogène, tandis que la P4 favorise la résistance à l'insuline. L'E2 favorise l'absorption musculaire de glucose dans les fibres musculaires de type I au cours d'un exercice de courte durée, ce qui devrait être bénéfique pour la performance lors d'exercices aérobies de plus forte intensité, tandis que la progestérone inhibe cette action (Campbell et Febbraio, 2002) Ainsi, l'augmentation de l'E2 par rapport à la progestérone peut déterminer l'influence des hormones ovariennes au cours de la phase lutéale sur l'absorption cellulaire du glucose, stimulée par l'insuline, et stimulée par la contraction et ainsi influencent de manière variable le stockage du glycogène et la disponibilité du glucose plasmatique pendant l'exercice.

2.3.2. Métabolisme des lipides

De nombreuses études suggèrent une plus grande utilisation des lipides durant l'exercice au cours de la phase folliculaire tardive ou mi-lutéale en comparaison à la phase folliculaire précoce (Dombovy et coll., 1987 ; Hackney et coll., 1991 ; Campbell et Febbraio, 2001 ; Zderic et coll., 2001). Ces mesures, effectuées par calorimétrie indirecte, ne présentent cependant pas de résultats similaires à ceux trouvés par d'autres auteurs (Suh et coll., 2002 ; Horton et coll., 2002, 2006 ; Devries et coll., 2006). Cependant, lorsque des suppléments d'E2 sont administrés, indépendamment de la progestérone, le quotient respiratoire est plus faible pendant l'effort par rapport à des suppléments combinés d'E2 et de P4, ou à des agonistes de GnRH qui entraînent la suppression de la sécrétion d'hormones stéroïdiennes chez les femmes (D'Eon et coll., 2022). Bien que les effets soient discutables, ces résultats suggèrent que les variations hormonales entraînent des modifications métaboliques chez la femme.

La détermination de la présence de glycérol est couramment utilisée comme indice du taux lipolytique (Klein et Wolfe, 1992). En effet, à la suite de l'hydrolyse des triglycérides dans le tissu musculaire et adipeux, le glycérol est libéré dans le sang. Le glycérol doit être rephosphorylé par l'enzyme glycérol kinase, présente essentiellement dans le foie et dans une moindre mesure dans les reins, avant de pouvoir être réutilisé dans la réestérification en triglycérides. Ainsi, la clairance hépatique du glycérol dans le sang semble être la seule voie significative de perte irréversible d'un traceur de glycérol (Wolfe, 1992). Néanmoins, il a également été suggéré que le muscle peut métaboliser une quantité importante de glycérol et, par conséquent, la totalité du glycérol libéré par l'hydrolyse intramusculaire du triacylglycérol n'apparaîtra pas dans la circulation sanguine (Elia et coll., 1993). Une étude (Horton et coll., 2006) ayant examiné la cinétique du glycérol au cours d'un exercice d'intensité modérée chez les femmes euménorrhéiques ne montre aucune variation significative de la cinétique du glycérol entre les phases menstruelles (mi-folliculaire et mi-lutéale). Cependant, l'augmentation moyenne de l'E2 entre ces 2 phases est relativement faible et ne permet probablement pas d'expliquer avec certitude l'influence des hormones sexuelles sur la cinétique du glycérol. Ainsi, les preuves limitées à ce jour suggèrent que l'E2 et la P4 au cours de la phase lutéale ne modifient pas la cinétique du glycérol, et par déduction, le taux lipolytique au cours de l'exercice. La considération du rapport E2/P4 permettrait également de mieux caractériser les phases du cycle menstruel, ce qui pourrait permettre de mettre en évidence certaines altérations. En effet, la recherche sur des rats montre que l'E2 permet d'augmenter le taux de lipolyse à l'exercice. Chez les rats, la supplémentation en E2, entraîne une sensibilité accrue aux catécholamines ainsi qu'une augmentation de l'activité des lipases hormono-sensibles (Benoit et coll., 1982). De plus, Hansen et coll. (1980) ont démontré une augmentation de la lipolyse et une réduction de la synthèse des acides gras dans les cellules adipeuses de rats

supplémentés en E2, tandis que la P4 n'a eu aucun effet en comparaison aux rats témoins qui n'ont pas été supplémentés. Il a également été constaté que la supplémentation en E2, chez le rat mâle, modifie l'activité des lipoprotéines lipases (LPL) d'une manière spécifique aux tissus (Ellis et coll., 1994). Alors que l'activité de la LPL adipocytaire est réduite, l'activité de la LPL musculaire est augmentée, favorisant une redistribution des lipides de l'adipose vers le tissu musculaire. Par conséquent, la supplémentation en E2 chez le rat non seulement augmente la teneur en lipides intramusculaires au repos, mais favorise également l'estérification des triglycérides pendant l'exercice sous-maximal dans le vaste interne, puisque la teneur en triglycérides est encore plus élevée après l'exercice qu'au repos (Ellis et coll., 1994).

La présence des acides gras libres (AGL) fournit un indice de disponibilité du plasma en AGL et renseigne sur la libération d'acides gras qui sont principalement dérivés de l'hydrolyse du triacylglycérol du tissu adipeux dans le plasma (Mittendorfer et coll., 2002). Lorsqu'il est utilisé comme mesure de la réponse lipolytique, la concentration en AGL ne tient pas compte de la réestérification des triglycérides (Romjin et coll., 2000). Ainsi, le taux d'absorption des AGL dans les tissus est utilisée comme estimation du taux d'oxydation des AGL circulants (Romjin et coll., 1993). Un certain nombre d'études ont alors examiné la cinétique des AGL plasmatiques, l'absorption des AGL dans les réserves corporelles et la cinétique des triglycérides plasmatiques entre les phases menstruelles (Heiling et Jensen, 1992 ; Uranga et coll., 2005 ; Magkos et coll., 2006). Aucune différence n'est visible sur les différentes variables mesurées au repos en fonction des variations hormonales. A l'exercice, la cinétique des AGL (taux d'apparition et d'absorption) reste inchangée entre la phase folliculaire précoce, la phase mi-folliculaire et la phase mi-lutéale (Horton et coll., 2006). Ainsi la magnitude de l'augmentation d'E2 pourrait être un facteur déterminant de l'influence des hormones ovariennes sur le métabolisme des graisses (Horton et coll., 2006). De plus, une concentration élevée en E2 au cours de la phase folliculaire tardive pourrait ainsi permettre de mettre en évidence ces variations (Horton et coll., 2006). L'E2 a également un rôle dans la régulation du métabolisme lipidique ; en effet, l'E2 favorise la maigreur et diminue la taille des adipocytes en diminuant l'absorption des acides gras dans le tissu adipeux (via une diminution de l'expression de la LPL, une diminution de la lipogenèse et de la synthèse des acides gras, et l'augmentation de la lipolyse stimulée par les catécholamines) (D'Eon et coll., 2005). Cependant, sa régulation dans les adipocytes diffère de celle opérée dans le foie, mais également dans les cellules musculaires. Dans les cellules musculaires, l'E2 entraîne l'augmentation de l'expression de diverses enzymes (LPL, pyruvate déshydrogénase kinase, acyl-CoA oxydase), qui favorisent la dissipation d'énergie et l'oxydation des AGL (D'Eon et coll., 2006).

L'AMP-activated protein kinase (AMPK) est considérée comme le principal régulateur d'énergie cellulaire. Elle stimule les processus métaboliques pour favoriser la production d'ATP (Jørgensen et

coll., 2006 ; Steinberg et coll., 2006). Une présence importante d'AMPK est associée à une teneur élevée en GLUT4, à une absorption de glucose induite par la contraction musculaire et à une absorption accrue d'acides gras cellulaires, bien que les preuves de son rôle dans la régulation de l'oxydation des graisses ne soient pas encore clairement établies (Jørgensen et coll., 2006). L'E2 est connu pour interagir et stimuler l'activité de l'AMPK (D'Eon et coll., 2005), ce qui suggère que des concentrations élevées en E2 pourraient augmenter l'absorption d'AGL. En effet, l'AMPK semble inhiber l'enzyme glycérol-3-phosphate acyltransférase, qui initie la synthèse des triglycérides, et de l'enzyme acétyl-CoA carboxylase qui régule la production de malonyl-CoA (Steinberg et coll., 2006). De plus, l'AMPK augmenterait l'activité de la malonyl-CoA décarboxylase, qui décompose le malonyl-CoA en acétylCoA (Steinberg et coll., 2006). Le malonyl-CoA étant connu en tant qu'inhibiteur puissant du CPT-I, et donc de l'entrée dans la mitochondrie des acides gras à longue chaîne, sa décomposition semblerait ainsi favoriser l'entrée des acides gras à longue chaîne dans les mitochondries pour une bêta oxydation.

En conséquence, les études issues de la recherche animale présentent des preuves que l'E2 favorise la lipolyse et augmente la disponibilité des AGL plasmatiques au cours de l'exercice, augmente les réserves intramusculaires de lipides et augmente la capacité cellulaire pour l'oxydation des AGL. Ainsi, de nombreuses actions métaboliques de l'E2 peuvent se produire par la stimulation de l'AMPK et l'activation des facteurs de transcription. Cette adaptation métabolique liée à la forte présence d'E2, favoriserait l'utilisation de lipides, ce qui pourrait être bénéfique à l'exercice d'endurance. Cependant, chez la femme, les études réalisées au repos ou durant l'exercice n'ont rapporté aucune différence dans la glycémie ou la cinétique des AGL.

2.3.3. Métabolisme protéique

Au repos, l'oxydation des acides aminés est plus importante au cours de la phase lutéale que folliculaire précoce (Kriengsinoyos et coll., 2004 ; Toth et coll., 2006). En effet, il existe une forte corrélation entre les mesures de l'oxydation de la phénylalanine et la concentration élevée en P4, suggérant que la P4 a le plus grand impact sur le catabolisme des acides aminés au cours de la phase lutéale (Kriengsinoyos et coll., 2004). En outre, la plus grande oxydation des acides aminés en phase lutéale, coïncide avec un plus grand besoin de lysine alimentaire au cours de cette phase, en comparaison avec la phase folliculaire (Kriengsinoyos et coll., 2004). Au cours d'un exercice sous-maximal prolongé, la concentration de divers acides aminés (alanine, glutamine, proline et isoleucine) est plus faible au cours de la phase lutéale en comparaison avec la phase folliculaire. Cela suggère un catabolisme plus important des acides aminés à l'exercice au cours de la phase lutéale. Les hormones ovariennes ont une influence notable sur le métabolisme des protéines au repos et durant l'exercice. Au cours de la

phase lutéale, l'augmentation du catabolisme, est associée à la concentration élevée en P4 (Kriengsinyos et coll., 2004), tandis que l'E2 peut atténuer le catabolisme des protéines (Hamadeh et coll., 2005).

Les hormones stéroïdiennes sexuelles ont donc une influence importante dans la régulation du métabolisme, aussi bien au repos qu'à l'exercice. Ces résultats obtenus dans diverses conditions, femmes euménorrhées, femmes ménopausées sous THS, ou encore souris suggèrent que, dans le milieu sportif, ces modifications métaboliques au cours du cycle menstruel peuvent avoir un impact important sur la performance. Cependant, comme en témoignent les résultats parfois contradictoires, l'influence des hormones ovariennes sur les voies métaboliques semblent spécifiques aux tissus. De plus, l'E2 et la P4 ont des influences opposées sur les différents systèmes, les réponses peuvent dépendre des concentrations des hormones ovariennes respectives. Ainsi, le choix des phases étudiées dans les futures études se doit d'être rigoureux afin de pouvoir étudier précisément le rôle respectif de l'E2 et de la P4 dans les altérations métaboliques visibles chez la femme.

Chapitre 4 – L'influence des hormones sexuelles sur les performances physiques

L'inclusion relativement faible des femmes en comparaison aux hommes dans les protocoles de recherche tend progressivement à diminuer. Néanmoins la population féminine ne correspond encore qu'à 35 % des publications scientifiques (Costello et coll., 2014 ; Emmonds et coll., 2019). La difficulté inhérente à intégrer des sujets féminins s'explique en partie par la complexité de gestion de leur statut hormonal (Bruinvels et coll., 2016). De nombreux travaux mettent en effet en évidence l'influence du cycle menstruel (ou des contraceptifs oraux, voire des traitements de substitution) sur les fonctions physiologiques et métaboliques chez la femme. Ces adaptations peuvent significativement moduler les qualités physiques et donc modifier la performance. De nombreux travaux ont vu le jour ces dernières années afin de déterminer le rôle d'E2 et P4 sur les performances physiques en sprint, en saut, en endurance, etc. Néanmoins, bien qu'un nombre conséquent d'études aient été réalisées, les effets du cycle menstruel sur la performance ne sont pas encore clairement établis. En effet, les différents protocoles mis en place ont fait émerger des conclusions hétérogènes qui s'expliquent majoritairement par la population étudiée (femmes sédentaires, sportives récréatives ou professionnelles), le type d'effort et outils d'évaluation, mais également en lien avec un désaccord sur la terminologie et les approches méthodologiques permettant de caractériser les phases du cycle menstruel (Elliott-Sale et coll., 2021). Pour preuve, parmi les études récentes réalisées entre 2008 et 2018, seulement 44 % des protocoles incluaient les dosages hormonaux sanguins en E2 et P4 (de Jonge et coll., 2019). Ainsi, et afin de pouvoir déterminer rigoureusement l'influence des hormones sexuelles sur la performance, des récentes recommandations méthodologiques ont été proposées (de Jonge et coll., 2019 ; Elliott-Sale et coll., 2021). Ces dernières permettent de mettre en évidence les considérations scientifiques nécessaires à la production de protocoles expérimentaux fiables et comparables.

1. Influence des hormones sexuelles sur la perception de la performance

Le cycle menstruel peut s'accompagner, en fonction des phases, de certains symptômes (céphalées, maux de ventre, constipation, fatigue). La période prémenstruelle et la période de menstruations s'accompagnent d'une augmentation de la douleur et de la sévérité de certains de ces symptômes (Taylor, 1979). Le cycle menstruel est donc susceptible de générer des douleurs physiques et des symptômes comportementaux de la phase prémenstruelle à la phase menstruelle. Ces symptômes, variables entre les femmes, peuvent potentiellement être un frein à la pratique sportive (Findlay et coll., 2020).

Un nombre important de sportives ont la sensation que le cycle menstruel impacte leur performance que ce soit à l'entraînement, comme en compétition (Armour et coll., 2020 ; Ergin et Kartal, 2020 ;

Findlay et coll., 2020 ; Solli et coll., 2020). Concernant les athlètes qui ne prennent pas de contraception orale, 77 % d'entre elles estiment que leur cycle menstruel altère leur performance (Martin et coll., 2018). Or, une enquête réalisée auprès de 189 athlètes internationales Australiennes met en évidence le manque de connaissance qu'ont ces femmes sur la connaissance du cycle menstruel (Larsen et coll., 2020). La perception de l'altération de la performance au cours du cycle menstruel à l'entraînement et en compétition est similaire, 50 à 71 % et 49 à 65 % respectivement (Armour et coll., 2020 ; Findlay et coll., 2020 ; Solli et coll., 2020). Les sportives ressentent une altération de la performance au cours de la période de menstruations et au cours de la phase prémenstruelle. Ce ressenti coïncide avec la présence de symptômes menstruels entraînant une fatigue psychologique (Armour et coll., 2020) ou un état de léthargie (Findlay et coll., 2020) qui sont les symptômes menstruels les plus fréquents chez les femmes (Scambler A. et G., 1985). La gestion du flux menstruel génère également une charge attentionnelle entraînant préoccupation et inquiétude à l'approche d'un évènement sportif (Findlay et coll., 2020 ; Armour et coll., 2020).

L'augmentation de la perception de fatigue au cours des phases FP et LT pourrait être expliquée par la production de sérotonine. L'E2 améliore la transmission de la sérotonine (Amin et coll., 2005) et augmente les taux de sérotonine (Blum et coll., 1996 ; Sze et coll., 2000) via l'augmentation de la production de tryptophane hydroxylase, ce qui augmentera la production de sérotonine (Bethea et coll., 2000). En effet, une étude sur 13 femmes a établi le lien entre la perception accrue de la sensation de fatigue au cours de la phase LT et des niveaux faibles de sérotonine, suggérant qu'une faible concentration d'E2 était responsable des faibles niveaux de sérotonine (Kikuchi et coll., 2010). De plus, les femmes souffrant du syndrome prémenstruel et de symptômes menstruels sévères présentent également des taux de sérotonine significativement plus bas dans les phases ML et LT en comparaison avec des femmes qui ne souffrent pas de ces symptômes (Rapkin et coll., 1987). La fatigue psychologique, étant identifiée comme un paramètre pouvant altérer la performance (Takeda et coll., 2015) les performances physiques pourraient être altérées au cours des phases LT et FP.

2. Performance et composition corporelle

La masse corporelle est un facteur déterminant de la performance sportive (Stachenfeld, 2008). La masse corporelle n'est pas affectée par les variations hormonales au cours des phases FP et ML (De Souza et coll., 1990 ; Lebrun et coll., 1995 ; Tsampoukos et coll., 2010). En revanche, un suivi journalier permet de mettre en évidence une augmentation du poids au cours de la phase LT et FP associée à une rétention d'eau (Watson et Robinson, 1965). Cette rétention d'eau est également avancée par d'autres auteurs via l'utilisation d'un impédancemètre (Sawai et coll., 2018). Ces résultats sont

contradictoires et mettent en avant la variabilité qu'il peut exister entre les femmes, mais également pour une même femme entre les différents cycles, sur ce paramètre anthropométrique. En revanche la masse graisseuse ne semble pas être altérée en fonction des phases du cycle menstruel (Lebrun et coll., 1995 ; Julian et coll., 2017 ; Rael et coll., 2020).

3. Influence des hormones sexuelles sur la performance de type anaérobie

L'évaluation de la performance réalisée au cours de sprints courts (15 à 40 m) reste inchangée en fonction des phases FT et ML (Sunderland et coll., 2003), FP, FT et LT (Kishali et coll., 2004), FP et ML (Somboonwong et coll., 2015 ; Julian et coll., 2017). En revanche sur des sprints plus longs, les résultats ne sont pas aussi clairs. La performance sur un sprint de 100 et 200 m est altérée au cours de la phase ML en comparaison avec la FT (Guo et coll., 2005). De plus, sur une tâche spécifique d'ergomètre à bras sur une épreuve de 500 m, la performance est également diminuée au cours de la phase ML (Guo et coll., 2005). Cependant, pour des sprints de 30 secondes effectués sur tapis roulant, non motorisé, la performance n'est pas altérée en fonction des phases FP, ovulatoire et ML (Tsampoukos et coll., 2010). La performance en natation sur une épreuve de 100 et 200 m n'est également pas affectée par les phases FP et LT (Quadagno et coll., 1991).

Lors de sauts, la performance en squat-jump est altérée en phase LT en comparaison avec la phase FP (Tasmektepligil et coll., 2010), alors que la plupart des auteurs n'observent aucune différence en fonction des phases au cours de squat-jump (Kishali et coll., 2004 ; Smirniotou et coll., 2004), saut avec contre-mouvement (Smirniotou et coll., 2004 ; Julian et coll., 2017), ou sauts répétés (Smirniotou et coll., 2004 ; Tounsi et coll., 2018). L'absence d'altération de la performance sur les sauts répétés, suggère que si l'élasticité et la raideur des tissus musculo-tendineux peuvent être altérés au cours du cycle, ces variations ne sont pas suffisantes pour moduler la performance (Miller et coll., 2007 ; Bryant et coll., 2008).

Ces résultats sur les sprints et les sauts, sont en accord avec les conclusions d'Eston et Burke (1984) qui évoquent qu'une performance sur une épreuve d'une durée inférieure à 3 min n'est pas affectée par le cycle menstruel. En effet, de nombreuses études dont les performances se mesurent en quelques secondes ne montrent aucune influence des variations en hormones sexuelles (Somboonwong et coll., 2015 ; Lebrun et coll., 1995 ; Julian et coll., 2017 ; Romero-Moraleda et coll., 2019 ; Kishali et coll., 2004 ; Lara et coll., 2019 ; Quadagno et coll., 1991 ; Smirniotou et coll., 2004). Néanmoins, certaines études mettent toutefois en évidence une altération des performances au cours du cycle menstruel durant la phase lutéale (ML et LT) (Guo et coll., 2005 ; Tasmektepligil et coll., 2010).

La force musculaire, déterminée par des tests mesurant les contractions volontaires maximales et la production de force, semble potentiellement affectée par les phases du cycle menstruel (Gordon et coll., 2013 ; Dos Santos Andrade et coll., 2016 ; Graja et coll., 2020 ; Shahraki et coll., 2020). Ainsi, le ratio de force isocinétique ischio-jambiers / quadriceps est amélioré, sur la jambe non dominante, au cours de la phase lutéale en comparaison à la phase folliculaire (Dos Santos Andrade et coll., 2016). Le pic de force isocinétique des quadriceps et des ischio-jambiers est altéré au cours de la phase FP en comparaison avec la phase ML et LT, respectivement (Gordon et coll., 2013), alors que pour certains auteurs, le pic de force isocinétique n'est pas altéré au cours du cycle menstruel (Lebrun et coll., 1995 ; Hertel et coll., 2006 ; Otaka et coll., 2018), tout comme la force évaluée au cours d'un ½ squat suivant différentes modalités de charge (Romero-Moraleda et coll., 2019). L'évaluation de la force des membres supérieurs présente des résultats contradictoires qui peuvent s'expliquer par une différence dans les muscles étudiés. En effet, Shahraki et coll. (2020) observent une force d'abduction de l'épaule dominante améliorée au cours de la phase ovulatoire en comparaison avec la phase FP et ML. A l'opposé, Kishali et coll. (2004) n'observent aucune altération de la force de préhension. Fait intéressant, la force maximale volontaire des quadriceps est altérée au cours de la phase LT en comparaison à la phase FT et ML (Graja et coll 2020) et FP (Rodrigues et coll., 2019). Ainsi, au cours de la phase folliculaire, l'activation volontaire maximale est supérieure à celle observée dans la phase lutéale. Étant donné que les différences de force seraient potentiellement plus importantes entre la phase FT et la ML, il est possible qu'aucune différence significative de force n'ait été observée car les mesures n'ont pas été effectuées au cours de ces phases (Lebrun et coll., 1995 ; Kishali et coll., 2004 ; Romero-Moraleda et coll., 2019).

La puissance étant la résultante de la force et de la vitesse, la modification de l'expression de l'un de ces déterminants pourrait entraîner une altération de cette qualité neuromusculaire. Évaluée sur cycloergomètres, la puissance de pédalage (pic de puissance et puissance moyenne) des membres inférieurs semble ne pas être altérée par le statut hormonal (Lara et coll., 2019 ; Štefanovský et coll., 2016), tout comme la puissance développée durant un squat jump avec différentes modalités (20, 40, 60 et 80 % de la force maximale) de charges additionnelles (Romero-Moraleda et coll., 2019) ou encore la puissance moyenne, le pic de puissance développé au cours d'un sprint de 30 secondes sur tapis roulant non motorisé (Tsampoukos et coll., 2010). En revanche, Cook et coll. (2018) observent une augmentation du pic de puissance au cours d'une répétition de 3 sprints de 6 secondes sur cycloergomètre. Le manque actuel de données sur l'influence du cycle menstruel sur la puissance pouvant être développée ne nous permet pas d'affirmer avec certitude l'influence, ou non, des variations hormonales sur la performance.

4. Influence des hormones sexuelles sur la performance de type aérobie

Les performances d'endurance, mesurées jusqu'au temps d'épuisement ne sont pas influencées par le cycle menstruel (Lebrun et coll., 1995 ; De Souza et coll., 1990 ; Goldsmith et coll., 2020). La majorité des études n'observent aucune différence entre les phases concernant la vitesse atteinte à $\dot{V}O_2\text{max}$ (Burrows et Bird, 2005), la $\dot{V}O_2\text{max}$ relative (De Souza et coll., 1990 ; Lebrun et coll., 1995 ; Smekal et coll., 2007 ; Vaiksaar et coll., 2011 ; Goldsmith et coll., 2020), la concentration en La (Miskec et coll., 1997 ; Smekal et coll., 2007 ; Tsampoukos et coll., 2010 ; Vaiksaar et coll., 2011 ; Štefanovský et coll., 2016 ; Lara et coll., 2019) ou encore la performance sur une épreuve de 2000 m sur rameur équipé d'un ergomètre (Guo et coll., 2005). La concentration en La, demeurant stable en fonction des phases du cycle menstruel, tout comme le temps d'épuisement, suggèrent que le cycle menstruel n'a pas d'effet significatif sur la performance aérobie.

Cependant des études démontrent une influence hormonale sur le quotient respiratoire à l'effort. Ainsi on observe une diminution du quotient respiratoire au cours de la phase ML en comparaison avec la phase FT (Dokumaci et coll., 2019) tandis que pour Goldsmith et coll. (2020) le quotient respiratoire augmente au cours de la phase ML en comparaison à la phase FP. Les deux études ont cependant utilisé un protocole progressif sur tapis roulant. Cependant, les temps de course et de repos différaient, les temps étaient de 5 minutes de course et de repos dans un protocole (Dokumaci et coll., 2019) et 3 minutes de course et 30 secondes de repos dans l'autre (Goldsmith et coll., 2020). Il a été suggéré qu'une augmentation du quotient respiratoire, donc une utilisation majorée des glucides, au cours de la phase ML pourrait être attribuée à une contrainte thermorégulatrice, cardiovasculaire et métabolique plus importante (Goldsmith et coll., 2020). De ce fait, cette phase ML entraînerait une fatigabilité métabolique plus importante.

Néanmoins, une enquête réalisée auprès de 185 femmes pratiquant la course à pied en compétition établie que plus de la moitié des participantes (57,3 %) ont réalisé leur meilleure performance en marathon au cours de leur phase lutéale (Greenhall et coll., 2020). On peut ainsi suggérer que sur une épreuve longue, à une intensité relative de course faible, le cycle menstruel puisse influencer sur les qualités d'endurance. En effet, au cours des études réalisées, l'effort était incrémental jusqu'à atteindre une intensité élevée puisque la $\dot{V}O_2$ était alors maximale. De ce fait, à une intensité élevée, la fatigabilité métabolique est présente beaucoup plus rapidement que sur une épreuve d'intensité moindre, bien que plus longue.

5. Influence des hormones sexuelles sur la fatigabilité

L'influence des hormones ovariennes sur les fonctions neuromusculaires et métaboliques peut aboutir à des altérations physiologiques importantes ; l'E2 pourrait jouer un rôle protecteur au niveau musculaire qui permettrait non seulement aux cellules musculaires de réduire l'inflammation induite par l'exercice et les dommages musculaires, mais également d'améliorer la récupération et la réparation musculaire (Tiidus, 2003). Plus précisément, l'E2 exerce un effet significatif sur la stabilité de la membrane musculaire tout en diminuant les dommages musculaires induits par l'exercice (Bär et coll., 1988). Ainsi, l'E2 permettrait de limiter la fatigabilité musculaire au cours d'un exercice.

5.1. Fatigabilité de la fonction neuromusculaire

Au cours du cycle menstruel, la fatigabilité pourrait être altérée en fonction des phases (Ansdell et coll., 2019). Ce constat ne fait pas consensus puisque certains auteurs n'observent aucune différence au cours d'exercices isométriques (Jarvis, et coll., 2011 ; Tenan et coll., 2016). Cette hétérogénéité de résultats peut s'expliquer par la variabilité dans les groupes musculaires étudiés (membres inférieurs et membres supérieurs), ou encore dans l'intensité de la contraction. En effet, en s'intéressant spécifiquement aux extenseurs des genoux, il a été démontré une fatigabilité réduite de ces muscles au cours de la phase lutéale lors d'une contraction à 60 % de la force maximale volontaire (Ansdell et coll., 2019), alors que pour le même groupe musculaire, Tenan et coll. (2016) n'observent aucune différence pour une contraction à 25 % de la force maximale volontaire. Les membres inférieurs et supérieurs ne semblent également pas être influencés de la même façon puisque les membres supérieurs ont une fatigabilité moindre au cours de la phase folliculaire (Petrofsky et coll., 1976, 2007). Ainsi, la fatigabilité semble être dépendante de l'intensité de la contraction et spécifique aux groupes musculaires. La typologie de ces groupes musculaires pourrait expliquer les différences dans les résultats observés (Pereira et coll., 2020). En revanche, des études menées sur des modèles animaux ont par ailleurs montré que l'E2 se lie aux récepteurs ER α au niveau musculaire (Wiik et coll., 2005, 2009) et qu'elle peut par son action limiter l'apparition de la fatigue sur des muscles comme le soléaire (Cabelka et coll., 2019).

Un exercice inhabituel, ou impliquant un allongement tel que des contractions excentriques, entraîne souvent une perturbation de la membrane musculaire et des lésions des fibres musculaires (Friden et coll., 1981) qui se manifestent par une perte de force musculaire au cours d'un exercice répété, ou encore par l'apparition de protéines myocytaires endommagées dans le sang (Clarkson et coll., 1992). Bien que de nombreuses études animales aient démontré que l'E2 peut atténuer de manière significative certains indices de rupture et de blessure de la membrane musculaire, et également la perte de force (Enns et Tiidus, 2008), toutes n'ont pas systématiquement relevé d'effets protecteurs

(Moran et coll., 2007). L'un des marqueurs les plus courants de la perturbation de la membrane musculaire est l'apparition de la protéine musculaire CK dans la circulation sanguine. Les niveaux de ce marqueur sont significativement plus élevés chez les rats mâles que chez les rats femelles suite à la réalisation d'un même type d'exercice excentrique entraînant des lésions musculaires (Bar et coll., 1988 ; Amelink et coll., 1990). Ces différences ont été spécifiquement attribuées à la présence d'E2, puisque les mâles, et femmes ovariectomisées, supplémentés en E2 présentent des réductions de l'activité CK similaires à celles des rats femelles saines (Persky et coll., 2000 ; Tiidus, 2001). Certaines études chez les hommes et les femmes ont montré des tendances similaires en ce qui concerne les indices de dommages musculaires, la perte de force et la libération de CK (Stupka et coll., 2000 ; Carter et coll., 2001). En revanche, beaucoup d'autres n'ont montré aucune différence entre les sexes (Clarkson et Hubal, 2001 ; Kerksick et coll., 2008). En effet, l'utilisation des taux sanguins de CK comme indicateur de la perturbation de la membrane musculaire post-exercice dans les études sur les hommes et les femmes s'est avérée problématique en raison de sa grande variabilité et des facteurs liés aux taux de clairance de la CK dans le sang (Hyatt et Clarkson, 1998 ; Warren et coll., 2006). Afin de déterminer l'influence de l'E2 sur la libération de CK, témoin de dommage musculaire, une première étude sur les rats suggèrent que l'E2 joue un rôle dans la stabilisation des membranes cellulaires musculaires pouvant atténuer la libération de CK après l'exercice (Amelink et coll., 1990). Ces auteurs suggèrent que les changements dans les niveaux de CK circulants pourraient refléter au moins indirectement et qualitativement les changements dans la perturbation de la membrane musculaire induite par l'exercice. À cet égard, une étude a examiné un certain nombre de marqueurs musculaires et sanguins des lésions musculaires et de l'inflammation induites par l'exercice chez des femmes ménopausées. La prise d'un THS à l'E2 permet de réduire significativement les dommages musculaires induits par l'exercice. Ainsi le THS à l'E2 semble avoir un effet protecteur contre les dommages musculaires induits par l'exercice chez les femmes (Dieli-Conwright et coll., 2009). Une hypothèse permettant d'expliquer le rôle protecteur de l'E2 réside dans sa similitude structurelle avec les antioxydants connus tels que la vitamine E, ce qui pourrait ainsi protéger les muscles contre les dommages et l'inflammation par un mécanisme similaire (Sugioka et coll., 1987).

Lorsque les cellules sont exposées à des conditions de stress ou de blessures, des réactions de peroxydation induites par les radicaux libres peuvent se produire, entraînant une rupture de la membrane. Des études *in vitro* ont démontré que l'E2 est capable d'inhiber considérablement la peroxydation des lipides membranaires (Persky et coll., 2000). *In vivo*, certaines études montrent des effets antioxydants de l'E2 après un exercice physique (Paroo et coll., 2002) et limitant les blessures musculaires (Stupka et Tiidus, 2001 ; Feng et coll., 2004), tandis que d'autres n'ont pas observé de changements liés à l'E2 dans les indices de stress oxydatif après l'exercice (Tiidus et coll., 1998). Les

études examinant les effets antioxydants de l'E2 chez les femmes sont limitées et les résultats, hétérogènes, s'expliquent probablement par le fait que les études chez la femme ont tendance à examiner les indicateurs chimiques du stress oxydatif dans le sang après l'exercice (plutôt que des biopsies musculaires réalisées chez le rat) et à se concentrer sur les différences basées sur le sexe plutôt que l'effets des variations hormonales (Enns et Tiidus, 2010).

En plus de son rôle potentiel d'antioxydant, l'E2 peut également protéger les muscles contre les dommages secondaires grâce à son influence sur divers régulateurs du catabolisme musculaire et de l'apoptose. Bien que relativement peu d'études soient disponibles dans ce domaine, Willoughby et Wilborn (2006) ont rapporté que les femmes au cours de la phase mi-lutéale avaient un niveau moindre d'ARNm de myostatine (régulateur du catabolisme des muscles squelettiques), 24 heures après une session d'exercice excentrique, tandis que les hommes présentaient des niveaux accrus. Bien que davantage de recherches doivent être effectuées dans ce domaine, les résultats actuels appuient les preuves de différences entre les sexes dans les mécanismes apoptotiques après un exercice intensif, suggérant que les hormones sexuelles ovariennes peuvent avoir une influence sur le catabolisme musculaire.

La fatigabilité neuromusculaire peut ainsi s'expliquer par l'altération des cellules musculaires, rendant *in fine* la contraction musculaire moins efficace, synonyme de perte de force. Néanmoins, la transmission de l'influx nerveux peut également jouer un rôle dans la fatigabilité. En effet, il a été démontré une augmentation de l'activation volontaire en fin de phase folliculaire (Ansdell et coll., 2019). Ainsi, la concentration élevée en E2 semble améliorer l'influx nerveux permettant ainsi une plus grande activation musculaire en comparaison avec les autres phases. En effet, outre ses effets anabolisants sur le muscle squelettique (Baltgalvis et coll., 2010), l'E2 est une hormone neuro-excitatrice qui peut améliorer l'activation musculaire volontaire (Slauterbeck et coll., 2002 ; Tenan et coll., 2013). Ainsi, la concentration élevée en E2 pourrait permettre de lutter contre la fatigue nerveuse.

5.2. Fatigabilité de la fonction métabolique

Malgré des concentrations musculaires similaires en glycogène entre les hommes et les femmes, la dégradation glycogénique semble être inférieure chez les femmes dans les fibres de type I au cours d'exercices courts et intenses (Esbjörnsson-Liljedahl et coll., 1999). De plus, à la suite d'un exercice d'intensité maximale et supra-maximale, les concentrations plasmatiques en catécholamines (activateur de la glycogénolyse et lipolyse) et La sont moins importantes (Esbjörnsson-Liljedahl et coll., 2002). Ainsi, ces résultats suggèrent que les femmes épargnent plus leurs stocks de glycogène au cours des exercices courts et intenses. De plus, la succession d'exercices explosifs entrecoupés de repos

génère au niveau des fibres II une meilleure resynthèse de l'ATP. La plus faible accumulation d'IMP et d'inosine chez les femmes favoriserait ainsi cette restauration de l'ATP (Esbjörnsson-Liljedahl et coll., 2002).

Les muscles des membres supérieurs et inférieurs ont des réponses métaboliques différentes aux hormones ovariennes qui peuvent influencer la fatigabilité induite par l'exercice. Il a été démontré que les muscles des membres supérieurs ont une plus grande dépendance au glycogène par rapport aux muscles des membres inférieurs (Ahlborg et Jensen-Urstad, 1991), ce qui expliquerait une fatigabilité moindre des membres inférieurs, notamment au cours de la phase lutéale qui favorise l'épargne de glycogène (Wismann et Willoughby, 2006). Ainsi, au cours de cette phase, la préservation des stocks de glycogène au niveau des membres inférieurs permettrait d'expliquer une amélioration de l'endurance au cours de la réalisation une tâche motrice d'extension du genou (Ansdell et coll., 2019).

Les fluctuations hormonales ovariennes peuvent également entraîner des conséquences sur la fatigabilité métabolique induite par l'exercice en raison des changements de la température centrale corporelle (Beidleman et coll., 1999). La P4 agit dans l'hypothalamus via les voies de la thermorégulation (Stephenson et Kolka, 1993), ce qui entraîne une légère augmentation de la température corporelle au cours de la phase lutéale, jusqu'à 0,5 °C (Maréchal et Mommaerts, 1963 ; Nakayama et coll., 1975). L'augmentation de la température corporelle au cours de la phase lutéale conduirait à une limitation de la capacité à maintenir des efforts prolongés, et participerait à une hausse du travail cardiovasculaire à l'effort pendant cette phase (de Jonge, 2003). En effet, lors d'une contraction isométrique des muscles de la main (test de préhension), l'immersion du bras dans de l'eau tiède (37 °C) diminue le temps d'épuisement par rapport à l'exercice effectué à 24 °C (Petrofsky et coll., 1976, 2007). Ces résultats confirment que l'augmentation de la température corporelle pourrait expliquer l'augmentation de la fatigabilité pendant la phase lutéale, induite par la progestérone. A l'inverse, des études ont montré que le temps menant à l'épuisement lors d'exercices prolongés d'intensité modérée était amélioré pendant la phase lutéale du cycle menstruel. L'effet thermogénique de la P4 est ici contrecarré par l'effet métabolique de l'E2 sur la stimulation du métabolisme lipidique (Willett et coll., 2021 ; Hackney, 2021).

Par conséquent, les données concernant les effets des variations hormonales sur la fatigabilité sont relativement divergentes. Ces incohérences s'expliquent par des différences méthodologiques, notamment dans le découpage des différentes phases étudiées. Les muscles des membres inférieurs et supérieurs semblent être différemment fatigables en réponse à un exercice. Ainsi la typologie musculaire pourrait être un élément à prendre en considération dans la recherche chez la femme.

Enfin, la nature des contractions au cours d'une tâche semble également entraîner des résultats différents en fonction des phases du cycle menstruel, à condition que ces dernières soient bien définies par la concentration relative de P4 par rapport à l'E2.

6. Influence des hormones sexuelles sur le risque de blessures

Les femmes sont de 2 à 6 fois plus susceptibles d'avoir une lésion des ligaments croisés antérieurs (LCA) que les hommes (Lin et coll., 2018). Plusieurs études ont montré que les lésions du LCA surviennent plus fréquemment lorsque la concentration en E2 est élevée à savoir au cours des phases FT (Wojtys et coll., 2002 ; Beynnon et coll., 2006 ; Adachi et coll., 2008), et ovulatoire (Schmitz et Shultz, 2013 ; Bell et coll., 2014 ; Hohmann et coll., 2015 ; Khowailed et coll., 2015 ; Shahraki et coll., 2020). Ce risque est associé à une laxité ligamentaire accrue (Chidi-Ogbolu et Baar, 2019 ; Shagawa, et coll., 2021). Néanmoins, l'E2 ne semble pas être la seule hormone susceptible d'influencer la laxité ligamentaire. En effet, l'augmentation de la concentration en relaxine, au cours des phases folliculaire et lutéale du cycle menstruel entraîne une diminution de la raideur du tendon rotulien (Pearson et coll., 2011). De plus, les athlètes souffrant d'une blessure des ligaments croisés antérieurs présentes des concentrations sanguines en relaxine plus importante que les athlètes non blessées (Dragoo et coll., 2011).

L'influence des variations hormonales sur la rigidité musculo-tendineuse a été étudiée dans un certain nombre d'études afin d'établir si le statut hormonal est un facteur de risque de lésions musculaires. L'augmentation d'E2 au cours de la phase folliculaire tardive diminue la synthèse de collagène et la densité de collagène présente dans les muscles et tissus conjonctifs, ce qui entraîne une diminution de la raideur musculaire (Yim et coll., 2018). Ainsi, Le cycle étirement-détente semble être modifié durant la phase ovulatoire, notamment en raison d'une diminution concomitante de la raideur musculaire et tendineuse (Eiling et coll., 2007 ; Ham et coll., 2020), d'une altération de la capacité de production de force (Bell et coll., 2011) ou encore d'une baisse du réflexe d'étirement (Casey et coll., 2014), toutes ces variations étant attribuées à la présence importante de l'E2. Bien que peu nombreuses, les études concernant l'efficacité du cycle étirement-détente sur l'articulation de la cheville semblent montrer une influence négative de la période ovulatoire sur cette qualité (Yim et coll., 2018).

La présence de ER dans les cellules du tissu conjonctif tendineux induit, en effet, une action spécifique de ces hormones dans ces structures. L'E2 est connu pour diminuer l'activité de la lysyl-oxydase dans les tendons, ce qui diminue leur résistance (Chidi-Ogbolu et Baar, 2019). Le maintien de niveaux d'E2 constants avec l'utilisation de contraceptifs oraux entraîne une diminution de la synthèse de collagène induite par l'exercice (Lee et coll., 2004 ; Miller et coll., 2006 ; Magnusson et coll., 2007 ; Hansen et

coll.,2009). La prise d'un THS à l'E2 induit une synthèse accrue du collagène tendineux (Hansen et coll., 2009). Chez les femmes ménopausées, l'incorporation de collagène dans le tendon rotulien au repos est 47% plus élevée chez les utilisatrices de THS (Hansen et coll., 2009). Même si l'utilisation d'un THS stimule l'incorporation de collagène au repos, l'exercice ne stimule en revanche pas l'incorporation de collagène (Hansen et coll., 2009). Néanmoins, la synthèse et l'incorporation de collagène ne semblent pas être influencées de la même manière par les variations en E2 (Hansen et coll., 2009). Ainsi, afin d'acquérir une meilleure compréhension de la façon dont l'E2 peut augmenter la teneur en collagène tout en diminuant la raideur des tendons chez les jeunes femmes, les chercheurs se sont tournés vers les modèles animaux. La création d'une carence en E2 chez le rat, induite par ovariectomie, entraîne une diminution de 28% de la teneur en collagène du tendon d'Achille (Ramos et coll., 2012). Lorsque les rates ovariectomisées sont traitées avec de la génistéine, un phytoestrogène isoflavone naturel, la teneur en collagène dans le tendon d'Achille est revenue à des niveaux initiaux (Ramos et coll., 2012). Fait intéressant, contrairement à l'E2 qui diminue la résistance des tendons, la génistéine n'a montré aucun effet sur les propriétés mécaniques du tendon d'Achille (Ramos et coll., 2012), suggérant que les phytoestrogènes produisent l'augmentation du collagène sans l'effet négatif sur la stabilité du tissu tendineux. Dans des cellules du tendon d'Achille en culture, Irie et coll. (2010) ont constaté que l'E2, ou un modulateur sélectif des récepteurs aux oestrogènes (SERM), augmentait l'expression du gène MMP-13, suggérant que l'E2 pourrait augmenter le taux de renouvellement du collagène. Il a été suggéré que l'E2 pourrait augmenter la teneur en collagène via à un effet indirect sur l'insulin Growth Factor 1 (IGF-1). En effet, chez les hommes et les femmes (Hansen et coll., 2013) et dans les ligaments artificiels (West et coll., 2015) l'administration d'IGF-1 augmente la synthèse du collagène tendineux. De plus, chez l'Homme, l'incorporation de collagène dans le tendon rotulien et la production locale de PINP sont significativement augmentés avec l'administration locale d'IGF-1 (Hansen et coll., 2013), suggérant que l'IGF-1 peut améliorer la synthèse et l'incorporation du collagène tendineux. En effet, l'E2 module directement les protéines de liaison à la fois à l'IGF-1 et à l'IGF (Hansen et coll., 2009) et peut donc atténuer ses effets positifs par une augmentation de la signalisation IGF-1. L'IGF1 peut à son tour modifier la teneur en collagène par une augmentation de la synthèse des protéines par la production de la protéine La-related protein 6 (LARP6). LARP6 est une protéine de liaison qui est augmentée par l'IGF-1 qui se lie directement à l'ARNm de collagène de type I et augmente spécifiquement la traduction du collagène de type I (Blackstock et coll., 2014). La raideur du complexe musculo-tendineux est associée à la performance dans les actions qui nécessitent des sauts ou des sauts réactifs, des sprints courts ou des tests de sauts multiples (Abdelsattar et coll., 2018 ; Chelly et Denis, 2001), car la raideur musculaire permet un meilleur stockage et une meilleure utilisation de l'énergie élastique (Abdelsattar et coll., 2018). Les variations hormonales pourraient ainsi altérer les performances via des changements dans la rigidité des tissus musculaires et tendineux. Néanmoins,

les résultats des études portant sur la rigidité des tissus en fonction des phases du cycle menstruel sont contradictoires puisqu'il a été conclu que toute augmentation de l'E2 au cours de la phase folliculaire tardive n'est pas suffisamment importante pour entraîner un changement significatif dans la synthèse du collagène ainsi que dans la diminution de la raideur musculo-tendineuse (Bryant et coll., 2008 ; Miller et coll., 2007).

La présence d'E2 entraîne donc une diminution du contrôle neuromusculaire au cours des phases folliculaire (Khowailed et coll., 2015) et ovulatoire (Hohmann et coll., 2015). L'E2 peut également potentiellement améliorer la qualité intrinsèque du muscle squelettique, ainsi que le contrôle neuromusculaire au cours de la phase ovulatoire (*Chapitre 3, 2.2.1. Influence hormonale sur les déterminants structuraux*). De plus, d'autres études ont mis en évidence qu'E2 et P4 peuvent influencer le système nerveux central (Hewett, 2000 ; Bäckström, et coll., 1983) et, par conséquent, ont un impact négatif sur le recrutement neuromusculaire (*Chapitre 3, 2.2.2. influence hormonale sur les déterminants nerveux*). Ainsi, les phases FT et ovulatoire présenteraient un climat hormonal défavorable au niveau musculo-squelettique pouvant augmenter le risque de blessures. Cependant, bien que le cycle menstruel semble influencer certains paramètres tels que la laxité ligamentaire ou la raideur tendineuse, une récente revue de littérature conclut à l'absence de corrélation entre les phases du cycle menstruel et le risque de lésion du LCA (Moriceau et coll., 2022).

7. Influence des hormones sexuelles sur la performance en football féminin

La faible inclusion des femmes dans les protocoles (Costello et coll., 2014) est encore plus importante dans la recherche en football (Kirkendall et Krstrup, 2021). Ainsi l'étude du cycle menstruel sur les facteurs de performance en football féminin est un domaine où il reste un travail important à réaliser afin de pouvoir déterminer avec précision l'influence des variations hormonales. Au cours des 10 dernières années, la majorité des études sur le cycle menstruel et le football évaluent l'influence du cycle menstruel sur le risque de blessure (Sutton et Bullock, 2013 ; Martin et coll., 2021), les troubles menstruels (Foster et coll., 2019 ; Gimunova et coll., 2022 ; Parker et coll., 2022 ; Pinel et coll., 2022) ou encore la perception des joueuses de l'impact qu'a le cycle menstruel sur leur pratique (McHaffie et coll., 2022 ; Mkumbuzi et coll., 2022 ; Bergström et coll., 2023).

Les joueuses perçoivent très négativement la phase FP et LT. En effet, la totalité des joueuses interrogées (n = 15) ressentent des symptômes altérant leur bien-être (diminution de l'appétit, et du sommeil, fatigue accentuée et puissance diminuée). Ainsi, au cours des phases FT et LT, la concentration diminue, tout comme la confiance en soi (Read et coll., 2022). La dimension psychologique, négative, au cours de ces phases pourrait ainsi suggérer une altération des

performances, voire un risque accru de blessure. Or, le taux d'incidence des blessures musculaires et tendino-ligamentaires est 2 fois plus élevée au cours de la phase FT en comparaison avec les phases FP et lutéale (Martin et coll., 2021). Ce suivi longitudinal auprès de 156 joueuses sur 4 saisons, met en évidence la corrélation entre une concentration élevée en E2 au cours de la phase FT et le taux d'incidence de blessure au cours de cette même phase.

La masse corporelle ainsi que la masse hydrique (analyse de la composition corporelle par bioimpédancemétrie) ont été évaluées chez 20 joueuses de 1^{ère} division Italienne. Les joueuses présentent des valeurs de masse corporelle ainsi que de masse hydrique plus importantes au cours de la phase FP et plus faibles au cours de la phase ovulatoire, ce qui n'affecte pas pour autant les performances en saut en contre mouvement et en sprint (20 m).

Afin de déterminer l'impact des variations hormonales sur la performance en football, les joueuses ont été évaluées à travers différents tests spécifiques (sprints, sauts, répétition de sprints, tests jusqu'à épuisement). La performance sur les tests de sauts, qui permettent d'évaluer les qualités explosives des membres inférieurs, n'est pas altérée au cours des phases FP, FT et lutéale (Tounsi et coll., 2018), FP et FT (Campa et coll., 2021), FP et ML (Julian et coll., 2017). Il en est de même pour les sprints (Julian et coll., 2017 ; Campa et coll., 2021).

Bien que peu d'études n'aient été réalisées, les résultats présentés laissent penser que la performance, mesurée au cours d'épreuves de type anaérobie, n'est pas influencée par le cycle menstruel chez des joueuses de football. De plus, au cours d'une épreuve de répétition de sprints en navette (Repeated Shuttle Sprint Ability) la performance au cours de la phase FP, FT et lutéale reste similaire (Tounsi et coll., 2018), tout comme l'endurance intermittente au cours d'un test Yo-Yo IRT (Tounsi et coll., 2018), ou encore d'un test Yo-Yo IET (Julian et coll., 2017). Néanmoins, bien que non significative, Julian et coll. (2017) observent une diminution de la distance parcourue lors du test au cours de la phase lutéale en comparaison avec la phase folliculaire. Cette diminution de la performance au cours de la phase lutéale, pourrait être expliquée par une utilisation plus importante des glucides. En effet, au cours de la phase folliculaire, la concentration d'E2 entraîne une oxydation plus importante des acides gras, ce qui peut améliorer la performance en endurance (Wohlgemuth et coll., 2021).

L'étude de certains facteurs déterminants de la performance en football en fonction du cycle menstruel ne permet pas, pour l'instant, de déterminer avec précision l'impact du cycle menstruel sur la performance en football. D'autant qu'au cours d'un match, les qualités physiques sont interdépendantes. Ainsi, un effet potentiel des hormones sexuelles sur une qualité physique, pourrait être contrecarré par une autre qualité physique. Dans ce sens, les travaux de Julian et coll. (2021) sont précurseurs puisque ces auteurs se sont intéressés, pour la première fois, à l'impact des variations

hormonales sur la performance en match de joueuses de football. Les données ont été recueillies auprès de 15 joueuses lors de matchs joués durant la phase folliculaire et lutéale. Au cours de la phase lutéale, la distance parcourue à très haute intensité en match, était plus importante qu'au cours de la phase folliculaire (Julian et coll., 2021). Cependant, les auteurs concluent que l'importante variance entre les mesures ne permet pas d'affirmer que la distance parcourue à très haute intensité soit altérée au cours du cycle menstruel.

L'ensemble de ces résultats, bien que peu nombreux en football féminin, ne permettent pas, pour l'heure, de déterminer précisément l'influence des variations hormonales sur la performance. De plus, les résultats observés dans un contexte non compétitif (Yo-Yo IET, Julian et coll. (2017)) semblent être en désaccord avec ceux observés durant les matchs de compétition (Julian et coll., 2021).

8. Précautions à prendre avant de travailler sur la thématique : cycle menstruel et performance

La grande majorité des sportives (67 à 91 %) sont euménorrhéiques (Dadgostar et coll., 2009 ; Verrilli et coll., 2018). Elles présentent donc un cycle non pathologique, néanmoins durant de nombreuses années, la recherche scientifique s'est désintéressé des femmes, en partie à cause des variations hormonales caractérisant le cycle menstruel. En effet, les considérations méthodologiques et difficultés d'interprétation des résultats au regard des phases étudiées furent longtemps considérées comme des freins (Elliott-Sale et coll., 2021). De ce fait, l'influence des hormones sexuelles sur la performance physique reste très débattue dans les résultats disponibles (Lebrun, 1993 ; Frankovich et Lebrun, 2000 ; de Jonge, 2003 ; Constantini et coll., 2005 ; Thompson et coll., 2020) et les conclusions mettent en avant que des études qualitatives sont nécessaires afin de comprendre l'influence des hormones sexuelles féminines sur l'expression des qualités physiques et la performance en sport. L'hétérogénéité dans ce domaine de recherche s'explique par le manque d'uniformité dans les protocoles scientifiques évaluant l'influence hormonale en sport. Ainsi, une récente revue de littérature décrit différents critères à respecter pour améliorer la qualité des recherches, et permettre la comparaison des études utilisant une terminologie et un design expérimental similaire (Elliott-Sale et coll., 2021).

8.1. Critères d'inclusion et de non-inclusion des participantes

Définir et caractériser la longueur et la régularité du cycle des participantes est un élément essentiel. Ainsi les participantes ayant une durée de cycle inférieure à 21 jours et supérieure à 35 ne sont pas considérées comme des durées de cycle physiologiques (Elliott-Sale et coll., 2021). Pour l'étude d'un

cycle menstruel ovulatoire « classique », définir l'absence de déficit de phase lutéale avec une concentration minimale en P4 est également indispensable (de Jonge et coll., 2019). Ainsi les participantes dont la durée de cycle ne correspondant pas à ces standards, ainsi que les participantes ayant un cycle irrégulier ou un déficit de phase lutéale ne doivent pas être incluses.

De plus, l'absence de prise d'un contraceptif oral permet de pouvoir déterminer l'influence des variations hormonales stéroïdiennes sur la performance. L'utilisation d'une contraception orale contenant des hormones synthétisées bloque les variations hormonales stéroïdiennes, de ce fait l'influence des variations hormonales ne peut être établie. Dans le cas de l'utilisation antérieure d'une contraception orale, un délai de 3 mois est préconisé afin de s'assurer que le cycle menstruel est redevenu stable.

8.2. Monitoring menstruel pour subdiviser les phases du cycle menstruel

Différentes méthodes sont utilisées dans les protocoles expérimentaux pour contrôler le statut hormonal des participantes (de Jonge, 2003). La technique de comptage des jours est une méthode simple à mettre en place, elle repose sur la supposition que la participante a un cycle menstruel, ovulatoire et régulier. Pour cela, les données des cycles précédents sont enregistrées et les jours seront comptés à partir du 1^{er} jour des menstruations (J1). Néanmoins, cette méthode ne nécessite aucun prélèvement sanguin, et donc le risque est important d'inclure des cycles anovulatoires. La durée des phases étant également variable, cette méthode, seule, ne permet pas de déterminer avec certitude la phase dans laquelle se trouve la participante. L'enregistrement de la température basale du corps permet quant à elle de détecter l'ovulation. En effet, la température basale corporelle augmente d'environ 0,3 °C à partir de l'ovulation et durant la phase lutéale (Horvath et Drinkwater, 1982 ; Marshall, 1963). Ainsi, en enregistrant la température corporelle on peut détecter si l'ovulation a eu lieu, et donc savoir si la participante est bien dans la phase lutéale. Autre méthode basée sur la détection de l'ovulation, la présence de LH dans les urines (kit d'ovulation). En effet, si un pic de LH est détecté, on peut supposer avec un niveau de confiance de près de 95 %, que l'ovulation se produira dans les 24 prochaines heures (Miller et Soules, 1996). Enfin, le dosage des concentrations sanguines de P4 et d'E2 permet de déterminer avec certitude la phase dans laquelle se trouve la participante. Les concentrations peuvent être obtenues par le sérum ou la salive, et les métabolites des deux hormones peuvent également être mesurés dans l'urine.

8.3. Choix des phases et actions hormonales associées

La définition des phases du cycle menstruel est déterminante pour étudier l'influence des variations hormonales. La nomenclature associée aux phases du cycle menstruel a suscité des débats entre les auteurs (Harlow et coll., 2012). A présent, il est défini que le cycle menstruel peut se diviser en 6 phases

permettant d'identifier le rôle et les actions propres à chaque hormone sexuelle (Charmichael et coll., 2021). Les jours du cycle correspondant aux phases sont donnés à titre informatif, en se basant sur un cycle régulier et typique de 28 jours.

- La phase folliculaire précoce (jour 1 à 5 du cycle menstruel). Au cours de cette phase les concentrations en E2 et P4 sont faibles. Cette phase est facile à déterminer puisqu'elle débute par une manifestation physique (menstruations).
- La phase folliculaire tardive (jour 9 à 13). Elle précède l'ovulation et le pic de LH. Lors de cette phase, la concentration en E2 présente les valeurs les plus élevées du cycle. La concentration en P4 demeure faible. Cette phase permet de mettre en évidence les différences entre les actions de l'E2 et de la P4 sur l'organisme mais cette phase est difficile à prédire sans dosage hormonal régulier.
- La phase ovulatoire (jour 14 à 16). Elle est confirmée par l'utilisation d'un kit d'ovulation urinaire. La concentration en E2 est toujours élevée (bien que légèrement inférieure à la concentration présente au cours de la phase précédente) tandis que la P4 demeure à une faible concentration.
- La phase lutéale précoce (jour 15 à 19). Elle précède l'ovulation. Au cours de cette phase, la concentration en P4 augmente, tandis que l'E2 diminue. Cette phase est transitoire et ne présente pas d'intérêt particulier d'un point de vue hormonal.
- La phase mi-lutéale (jour 18 à 24). Dans les 7 jours suivants l'ovulation, la concentration en E2 remonte pour atteindre des niveaux supérieurs à la phase folliculaire précoce et ovulatoire, mais inférieurs à la phase folliculaire tardive. Cette phase permet d'évaluer l'action de la P4 dont la concentration est maximale. Dans le cas où l'ovulation n'a pas été confirmée, une concentration en P4 supérieure à 16nmol.L^{-1} permet de réduire le risque d'inclure des cycles anovulatoires.
- La phase lutéale tardive (jours 24 à 28). La chute de la concentration en E2 et P4 s'accompagne pour certaines femmes de l'apparition de symptômes pré-menstruel. Il convient ainsi d'être vigilant au cours de cette phase aux réponses inter-individuelles liées à la présence, ou non, du syndrome pré-menstruel.

Ainsi, les recommandations se basant sur le profil hormonal au cours du cycle menstruel ont permis de déterminer ces 6 phases présentant une combinaison hormonale et un rapport E2/P4 spécifique.

En effet, limiter le cycle menstruel aux phases folliculaire et lutéale amène à des erreurs que l'on retrouve dans les études parfois très contradictoires.

Les phases les plus souvent étudiées sont la phase menstruelle précoce, la phase folliculaire tardive, la phase ovulatoire et la phase mi-lutéale (Elliott-Sale et coll., 2021). Ces phases permettent de caractériser le cycle menstruel et de pouvoir appréhender les effets des différentes hormones sexuelles comme suit :

- Phase folliculaire précoce : concentration faible en LH, FSH, E2 et P4. Au cours de cette phase, le climat hormonal dénote une absence d'hormones sexuelles.
- Phase folliculaire tardive : concentration élevée en E2, faible en LH, FSH et P4. Au cours de cette phase, le climat hormonal est propice à mesurer les effets de l'E2.
- Phase ovulatoire : concentration élevée en E2, LH, FSH et faible en P4. Au cours de cette phase, le climat hormonal permet de mesurer les effets de LH et FSH, associés à ceux de E2.
- Phase mi-lutéale : concentration élevée en E2 et P4, faible en LH et FSH. Au cours de cette phase, la concentration élevée en P4 permet d'observer les effets de P4 sur l'organisme.

Il est donc nécessaire afin de réduire la probabilité de regrouper des profils hormonaux hétérogènes, et de réduire les incohérences dans les définitions des phases, d'effectuer une vérification par analyse sanguine. Cette dernière viendra augmenter la fiabilité des résultats et de l'étude (Hackney et Viru, 2008). L'action spécifique des E2 et P4 sera donc déterminée en effectuant des sessions expérimentales au cours des phases folliculaire précoce, tardive, et la phase mi-lutéale. Afin de minimiser les biais expérimentaux, il convient également de standardiser l'heure à laquelle les évaluations ont lieu ainsi que l'apport nutritionnel car ces paramètres sont connus pour affecter la concentration des hormones sexuelles (Elliott-Sale et coll., 2021). Pour améliorer notre compréhension de l'influence des variations hormonales sur la performance sportive, des études qualitatives sont nécessaires, les recommandations évoquées permettront ainsi de pouvoir disposer de plus amples connaissances sur l'impact de cette spécificité physiologique sur la performance des femmes.

La performance est perçue comme altérée de manière significative chez la plupart des sportives au cours de la phase FP et LT (Armour et coll., 2020 ; Findlay et coll., 2020). Une importante revue systématique avec méta-analyse, démontre et confirme la perception des femmes puisque la performance physique, objectivement mesurée, semble être diminuée de façon triviale au cours de la phase FP (McNulty et coll., 2020). Dans cette étude, la notion de performance physique regroupe l'ensemble de performances évaluées dans les différents protocoles (que ce soit sur une épreuve de sprint court, ou de saut, ou encore au cours de l'évaluation de la $\dot{V}O_{max}$). La performance étant multifactorielle, il est difficile de pouvoir dégager avec certitude l'influence du cycle menstruel sur une qualité physique isolée.

Néanmoins, autre résultat intéressant de cette méta-analyse, la majorité des études traitant de l'impact des variations hormonales sur la performance sont des études de faible qualité (42 %), voire très faible qualité (26 %). Ce qui s'explique en partie par une absence de dosage sanguin, ou que les auteurs ne s'intéressent qu'à la comparaison entre 2 phases du cycle menstruel. En effet, dans un nombre important d'études, l'évaluation de l'influence des variations hormonales sur la performance se fait au cours de la phase FP et ML. Or au cours de ces phases, les effets potentiels de l'E2 ne sont pas évalués, d'où la nécessité de prendre en compte la phase FT dans le design expérimental (Elliott-Sale et coll., 2021). Ainsi l'effet trivial que peut avoir la phase FP s'explique entre autres par le faible nombre d'études disponibles, le faible nombre de participantes recrutées (14 femmes en moyenne), mais également le niveau de pratique. Toutes ces variables entraînent une large variance dans la détermination de l'influence que peut exercer le cycle menstruel sur la performance sportive.

Cependant, cette influence bien que triviale doit être considérée dans le sport de haut-niveau, où la victoire peut se jouer sur des détails (McNulty et coll., 2020). Enfin, il convient de rappeler que les variations hormonales entraînent des réponses propres à chaque femme, et à chaque cycle. Ainsi, la performance d'une sportive peut être altérée au cours d'une phase de son cycle menstruel alors que pour une autre ce ne sera pas le cas. De ce fait, une approche individualisée est nécessaire afin de pouvoir répondre aux besoins de chaque femme.

Chapitre 5 – Problématique et objectifs de recherche

1. Problématique

Au regard des données actuelles de la littérature traitant de la thématique du cycle menstruel en football, de nouveaux travaux sont nécessaires. Les résultats actuels demandent à être confirmés, ou infirmés puisque le cycle menstruel n'a pas été analysé rigoureusement au regard des variations hormonales qui le caractérisent. On sait que la phase folliculaire précoce est perçue par les joueuses comme altérant la performance, la phase folliculaire tardive où le rôle de l'E2 est prédominant peut permettre d'améliorer les aspects structuraux musculaires. Enfin la phase mi-lutéale permet d'observer les effets de la P4, et de son action inhibitrice sur l'E2. Néanmoins, dans la littérature scientifique, on ne trouve actuellement aucune étude permettant de déterminer l'influence de 3 phases du cycle menstruel (phase FP, phase FT, et phase ML) sur la performance de joueuse de football. Pour répondre à cette problématique, nos objectifs ont donc ainsi été définis autour de ces 3 phases, caractéristiques des variations hormonales ayant lieu au cours du cycle menstruel.

2. Objectifs et hypothèses

Le premier objectif de cette thèse fut d'évaluer l'influence de ces différentes phases du cycle menstruel sur les performances athlétiques réalisées lors de matchs de football féminin afin d'identifier le rôle des variations hormonales sur la performance physique. Bien que les travaux de Julian et coll. (2021) soient novateurs, les auteurs se sont intéressés qu'à 2 phases du cycle menstruel, à savoir la phase folliculaire et la phase lutéale. Ils n'ont donc pas pris en compte les variations hormonales qui caractérisent la phase folliculaire. En effet, au cours de la phase folliculaire les concentrations en œstrogènes varient considérablement entre le début et la fin de cette phase, c'est la raison pour laquelle nous avons évalué la performance au cours de 3 phases distinctes du cycle menstruel (phase FP, phase FT, et phase ML). Ces phases, retenues en accord avec les récentes recommandations méthodologiques, présentent des concentrations en œstrogènes et progestérone (ainsi que le rapport œstrogènes/progestérone) différentes permettant de déterminer l'influence des hormones sexuelles féminines sur la performance physique. Au cours de la phase folliculaire précoce, certains auteurs observent une augmentation de la masse corporelle (Stachenfeld et coll., 2008). Cette augmentation pourrait altérer la performance dans les disciplines sportives où l'on retrouve des sauts, des courses (Lebrun, 1993). En effet, la masse corporelle est déterminante dans ce type de mouvements. De plus, un nombre important de sportives ont la sensation que le cycle menstruel impacte leur performance (Findlay et coll., 2020). Cela s'explique en partie par diminution de la motivation, mais également l'humeur négative associée à cette phase (Chrisler et coll., 2015 ; Schooler et coll., 2005). Ainsi, la performance en football pourrait être diminuée au cours de la phase folliculaire précoce.

Les concentrations en E2 et P4 sont également connues pour influencer le métabolisme ainsi que la fonction neuromusculaire (Pallavi et coll., 2017). Au cours de la phase ML, une concentration élevée en E2 et P4 améliore le stockage et l'épargne du glucose, pouvant ainsi permettre de retarder l'épuisement des réserves énergétiques. Ainsi, nous pouvons nous attendre à ce qu'au cours de cette phase, la distance parcourue en match puisse être plus importante, que ce soit par mi-temps, ou bien sur l'ensemble du match.

Le second objectif de cette thèse a donc été de déterminer dans un contexte écologique mais non compétitif, l'influence des variations hormonales sur les principaux déterminants physiologiques de la performance physique en football féminin. En effet, une seule étude (Tounsi et coll., 2018) a déterminé l'influence des variations hormonales auprès de joueuses de football au cours des 3 phases caractéristiques du cycle menstruel. Néanmoins, le faible nombre de participantes (n = 11) ne permet pas de dégager des certitudes et des travaux complémentaires doivent être menés. Selon les auteurs, la performance évaluée au cours d'une épreuve de saut (*five-jump test*), ainsi que la performance au cours d'une épreuve de courses en navette (*repeated shuttle-sprint ability*), et de courses intermittente (*Yo-Yo IRT1*) ne semblent pas être altérées au cours du cycle menstruel. Bien que la vitesse de course, et la vitesse maximale de course, soient des déterminants de la performance en football, ces variables n'ont cependant pas été évaluées par Tounsi et coll. (2018). Ainsi nous pouvons nous attendre à ce que la vitesse de course au cours de sprints (distance de 0 à 40 m), ainsi que la vitesse de déplacement dans une épreuve d'agilité comprenant des changements de directions et une dimension technique (conduite de balle) puisse être modifiée au cours des différentes phases du cycle menstruel. En effet, l'influence du cycle menstruel semblerait différer en fonction des qualités physiques évaluées.

Sous réserve d'une altération visible des aptitudes physiques en fonction des phases du cycle menstruel, la prise en considération dans l'entraînement du statut hormonal des joueuses pourrait être une nouvelle possibilité d'individualisation de l'entraînement. L'ajout de ces données physiologiques dans le monitoring des joueuses permettrait de pouvoir proposer un contenu de séance plus adapté, d'optimiser les gains de l'entraînement et, potentiellement, la performance en football féminin.

PARTIE II

TRAVAUX PERSONNELS

1. Introduction

Les variations hormonales présentes au cours du cycle menstruel agissent sur de nombreux systèmes physiologiques tels que les systèmes cardiovasculaire, respiratoire, métabolique et certains paramètres neuromusculaires qui peuvent altérer la performance athlétique. Les divergences méthodologiques des études évaluant l'influence du CM sur la performance sont la cause actuelle des nombreuses contradictions au niveau des résultats dans la littérature scientifique.

Le football est un sport intermittent dont la performance est d'origine multifactorielle. Elle requiert en effet de nombreuses qualités athlétiques mettant en jeu différentes voies énergétiques et des spécificités neuromusculaires. Bien que le CM ait un impact sur ces paramètres, il est surprenant de constater que l'influence des variations hormonales sur la performance en football n'a été que très peu étudiée.

Quelques études se sont intéressées, de façon décontextualisée (en laboratoire, et de ce fait, éloignées de la réalité du terrain), à l'influence du cycle menstruel sur certaines qualités physiques, déterminantes de la performance chez la joueuse de football, comme notamment la force maximale évaluée par isocinétisme (Dos Santos Andrade et coll., 2016). Cette étude, réalisée auprès de 26 joueuses de football, démontre que le cycle menstruel exerce une influence sur le rapport de force maximale du couple ischio-jambiers/quadriceps. Au cours de la phase folliculaire, ce ratio est plus faible qu'en phase lutéale, néanmoins cet effet n'est visible que sur la jambe non-dominante. Bien que les auteurs ne précisent pas les jours correspondant aux phases étudiées, il convient de noter que le cycle menstruel influence l'équilibre musculaire des membres inférieurs. Dans une activité comme le football où la jambe non-dominante permet notamment de se stabiliser pour frapper, de prendre une impulsion pour sauter, ou encore d'effectuer des changements de direction, l'influence des variations hormonales peut donc entraîner une modification non négligeable de la performance. Bien que ces résultats de laboratoire soient intéressants, il convient également d'évaluer l'impact que peut avoir le cycle menstruel sur les facteurs de performance dans un contexte écologique, *ie.* sur le terrain, afin de renforcer la spécificité et la validité des mesures effectuées (Balsom, 1994 ; MacDougall et coll., 1991).

Nos travaux, se décomposent en 2 axes et ont permis de déterminer l'influence des variations hormonales au cours du CM sur la performance sportive en football féminin dans un contexte compétitif mais également hors-compétitif à l'entraînement. Cela a ainsi permis d'avoir une plus grande compréhension des modifications physiologiques qui peuvent avoir lieu au cours des différentes phases du CM et ainsi de pouvoir proposer une individualisation dans le domaine de l'entraînement sportif.

L'étude 1 visait à déterminer l'influence du cycle menstruel sur la nature et l'intensité des déplacements en match chez des joueuses de football semi-professionnelles. Les données recueillies grâce à des capteurs connectés, dans un contexte compétitif et écologique furent également analysées en prenant en compte la dimension temporelle du match.

L'étude 2 avait pour but de déterminer l'influence du cycle menstruel sur les différentes qualités physiques déterminantes de la performance en football féminin de haut niveau. Ces évaluations ont été réalisées dans un contexte hors-compétitif qui permet non seulement de garantir la spécificité des mesures mais également d'évaluer indépendamment l'influence des variations hormonales sur les facteurs de performance en football féminin.

L'environnement dans lequel se sont déroulées ces études (contexte compétitif et hors-compétitif) nous a amené à effectuer différents choix méthodologiques, c'est la raison pour laquelle nous présenterons les études et leurs résultats de façon dissociée. Ces 2 études ont été approuvées par le comité d'éthique compétent (Comité de Protection des Personnes Ile de France V, n°19.04.24.44735).

2. Méthodologie de la recherche

2.1. Participantes

Durant ce travail de thèse, les données ont été recueillies grâce à la participation des joueuses de l'équipe première de l'Association Sportive de Saint-Etienne évoluant alors en 2^{ème} division du championnat de France. Durant les 3 saisons de recueil de données (saisons 2018/19 à 2020/21), marquées par la pandémie de COVID19, l'équipe a été classée respectivement à la 2^{ème} place, 2^{ème} puis 1^{ère} place synonyme d'accession en première division (D1 Arkéma) pour la saison 2021/22.

Les participantes, joueuses semi-professionnelles, s'entraînent à raison de 5 à 7 entraînements par semaine. Ainsi sur les 42 joueuses ayant composé l'effectif au cours de ces 3 saisons, toutes étaient volontaires, néanmoins les 13 joueuses utilisant une contraception hormonale (pilule contraceptive, stérilet, implant sous cutané) ont été exclues. En football, le taux d'utilisation de la pilule contraceptive est compris entre 28 et 35,8 %, (Parker et coll., 2022 ; Sundgot-Borgen et Torstveit, 2007). Dans notre

population, il est conforme à ces standards, puisque 30,9 % des joueuses utilisent une contraception orale. Bien qu'inférieure à celle retrouvée dans les autres sports (49,5 %, Martin et coll., 2017), l'utilisation de contraceptifs hormonaux oraux, critère principal de non-inclusion à nos protocoles, est un paramètre qui explique la participation limitée à nos études. Parmi les 29 joueuses qui n'utilisaient pas, ni au cours des 6 derniers mois, de contraception hormonale seules 21, initialement incluses présentaient un cycle régulier. Leurs caractéristiques physiques sont présentées dans le tableau 1.

Afin de pouvoir déterminer l'influence des variations hormonales sur la performance physique au cours d'un match 8 participantes ont finalement été retenues (Figure 6). Les joueuses retenues pour cette étude ont participé (temps de jeu supérieur à 80 min) à minima à 3 matchs au cours de chacune des phases étudiées (FP, FT, ML). Les données ont été recueillies durant les matchs comptant pour le championnat de France de seconde division durant les saisons 2018/19 à 2020/21. Les gardiennes de but ont été exclues en raison de la spécificité de leur poste.

Enfin pour l'étude de l'influence du cycle menstruel sur les facteurs déterminants de la performance physique, 14 joueuses ont pu réaliser l'intégralité du protocole (Figure 6). Les concentrations en P4 mesurées au cours de la phase ML ne correspondaient pas aux standards minimums permettant de confirmer l'ovulation pour 3 d'entre elles, qui ont donc été exclues. Les contraintes logistiques inhérentes aux sessions expérimentales, les blessures contractées au cours des entraînements entre les sessions, les conditions météorologiques ont empêché l'organisation de l'intégralité des 3 sessions expérimentales pour 7 joueuses.

	Moyenne ± Ecart-type
Age (années)	25,9 ± 3,5
Taille (cm)	168,7 ± 3,63
Poids (kg)	60,8 ± 8,1
Masse grasse (%) *	22,8 ± 2,6
Durée du cycle menstruel (jours)	29,4 ± 1,4

* Méthode des plis cutanés (Durnin et Womersley, 1969)

Tableau 1. *Caractéristiques physiques des participantes aux études*

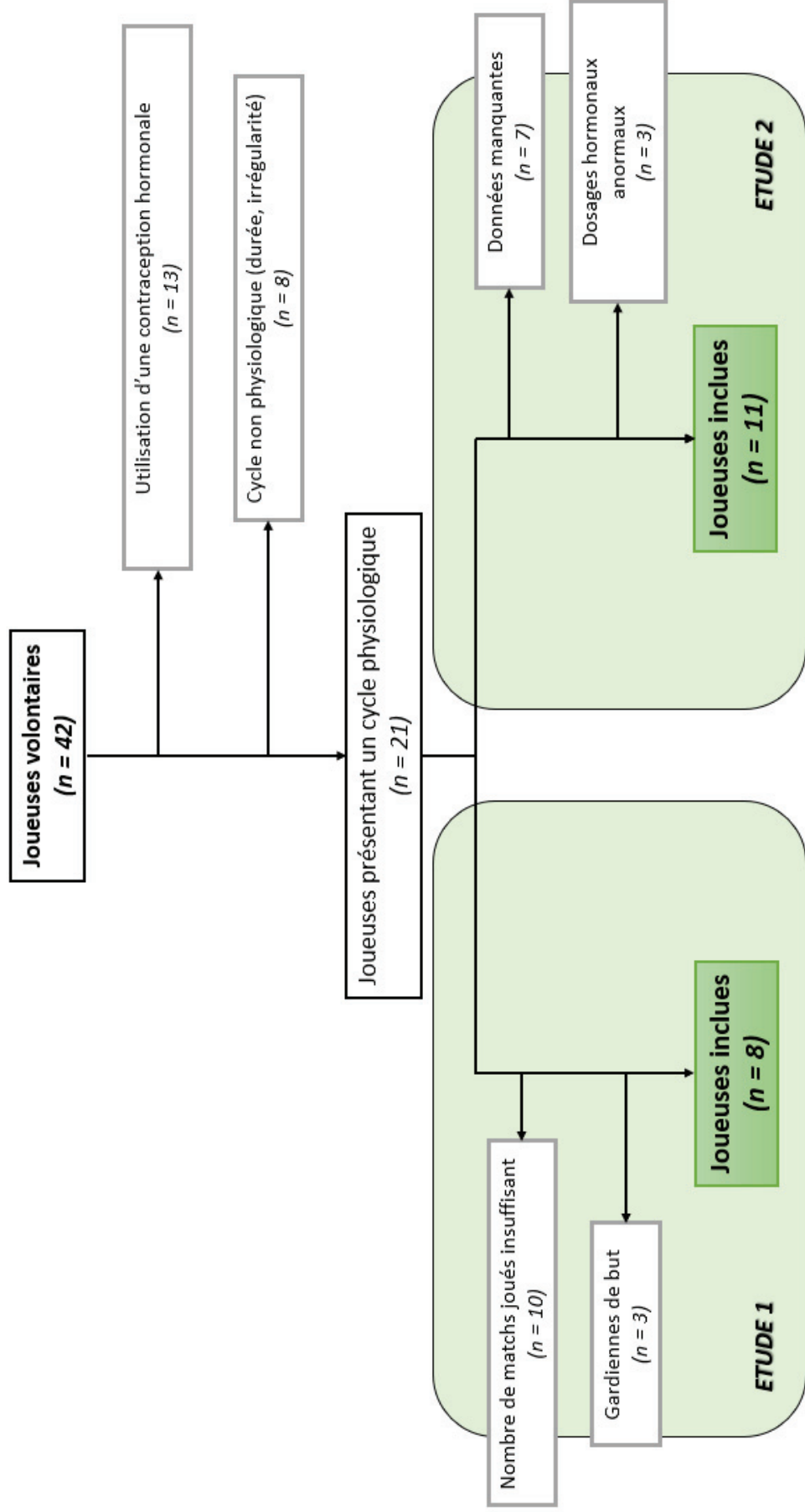


Figure 6. Représentation des étapes préalables à l'inclusion des participantes

2.2. Monitoring menstruel

En s'appuyant sur les travaux précédemment réalisés (de Jonge et coll., 2003 ; Tsampoukos et coll., 2010), et compte tenu de l'intérêt de l'analyse des phases du cycle menstruel présentant une combinaison hormonale distincte, l'évaluation des participantes eut lieu au cours des phases folliculaire précoce (FP, jour 1 à 4), folliculaire tardive (FT, jour 10 à 13) et mi-lutéale (ML, jour 20 à 23). Les recommandations récentes, ne nous ont que conforté dans ce choix puisque les phases que nous avons retenu sont celles dorénavant recommandées (Elliott-Sale et coll., 2021).

A chaque nouveau cycle menstruel, les participantes communiquaient la date du premier jour de menstruations. Cette méthode de suivi calendaire, est simple à mettre en place et permet à postériori (dès le cycle suivant) de vérifier la régularité du cycle, et donc de confirmer que les sessions ont eu lieu au cours des phases attendues. Cette méthode, nous a permis d'effectuer un monitoring menstruel permettant d'obtenir un aperçu sur plusieurs cycles, et ainsi planifier et anticiper les sessions expérimentales. En effet, bien que le cycle menstruel des participantes soit normal et régulier, il est possible que la période de menstruations arrive 1 à 2 jours avant, ou après, la date initialement prévue. L'organisation des sessions expérimentales nécessitant la réservation de moyens matériel et humains mais également l'installation du matériel expérimental, ce monitoring menstruel est indispensable.

2.3. Dosages hormonaux

Les contraintes inhérentes à l'organisation des matchs, ne nous ont pas permis d'effectuer des dosages sanguins hormonaux. Ainsi, le postulat implique que lors des matchs officiels, les joueuses présentent un cycle ovulatoire, ce qui peut être considéré comme une limite à notre travail comme nous le verrons dans la **partie III** (*Conclusions générales, applications pratiques & perspectives*).

Les prélèvements sanguins réalisés dans un contexte hors-compétitif ont permis de confirmer que les concentrations hormonales en E2 et P4 correspondaient bien aux niveaux attendus. Les résultats sanguins permettent alors de valider le recueil de données effectué au cours de la session expérimentale.

3. Etude 1 : Influence des différentes phases du cycle menstruel sur les déplacements en match chez des joueuses de football semi professionnelles

Impact of the menstrual cycle phases on the movement patterns of sub-elite women soccer players during competitive matches

Pierre-Hugues Igonin, Isabelle Rogowski, Nathalie Boisseau et Cyril Martin

Publiée dans International Journal of Environmental Research and Public

Health Volume 19, Issue 8 (2022)



Article

Impact of the Menstrual Cycle Phases on the Movement Patterns of Sub-Elite Women Soccer Players during Competitive Matches

Pierre-Hugues Igonin ^{1,2}, Isabelle Rogowski ¹, Nathalie Boisseau ^{3,*} and Cyril Martin ^{1,*}

¹ Laboratoire Inter-Universitaire de Biologie de la Motricité (LIBM EA7424), Université Claude Bernard Lyon I, 69100 Lyon, France; ph.igonin@hotmail.fr (P.-H.I.); isabelle.rogowski@univ-lyon1.fr (I.R.)

² Association Sportive de Saint-Etienne (ASSE), 42000 Saint-Etienne, France

³ Laboratoire des Adaptations Métaboliques à l'Exercice en Conditions Physiologiques et Pathologiques (AME2P), Université Clermont Auvergne, 63000 Clermont-Ferrand, France; nathalie.boisseau@uca.fr

* Correspondence: cyril.martin@univ-lyon1.fr

† These authors contributed equally to this work.

Abstract: The purpose of this study was to evaluate the influence of the menstrual cycle phases on the movement patterns of sub-elite women soccer players during competitive matches over three consecutive seasons. Individual movement data were analyzed and compared in eight players from the second French League at the early follicular (EF), late follicular (LF) and mid-luteal (ML) phases of their menstrual cycle, determined by the calendar method. The movement patterns, expressed as meters per minute, were recorded during competitive matches using devices placed on the player's ankle. Our results showed significantly lower distances covered at moderate and high velocity in the EF phase than in the LF and ML phases (Cohen's *d* effect size = 1.03 and 0.79, respectively). The total distance covered during matches and the number of sprints also were reduced during EF compared with LF (*d* = 0.78 and 0.7, respectively). Overall, the total distance and distance covered at low velocity were significantly lower during the second half-time of the matches (*d* = 1.51), but no menstrual cycle phase × game period interaction was noted. In conclusion, our study suggests that EF may impact the movement pattern of sub-elite women soccer players during competitive matches, without any modulation of this effect by the playing time. Despite the low sample size, these results can be useful for coaches and support staff to modulate training loads and player rotation during soccer games.

Citation: Igonin, P.-H.; Rogowski, I.; Boisseau, N.; Martin, C. Impact of the Menstrual Cycle Phases on the Movement Patterns of Sub-Elite Women Soccer Players during Competitive Matches. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2022**, *19*, 4465. <https://doi.org/10.3390/ijerph19084465>

Academic Editor: Paul B. Tchounwou

Received: 10 March 2022

Accepted: 6 April 2022

Published: 7 April 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Keywords: women soccer players; menstrual cycle phase; menstruation; performance; football

1. Introduction

The menstrual cycle follows a biological rhythm with large cyclic fluctuations in endogenous sex hormones, including estrogen and progesterone. It can be divided into different phases in the function of sex hormone production and consequently, their concentrations in the body. The follicular phase starts with the onset of menstruation until ovulation. During the early follicular (EF) phase, estrogen (E2: 17β-estradiol) and progesterone (P4) plasma concentrations are low. In the late follicular (LF) phase, E2 progressively increases and reaches a peak before ovulation at the LF end, while P4 remains low. The luteal phase starts with ovulation and is associated with the elevation of P4 concentration. Studies in rodent models (after E2 and P4 supplementation) and in humans have shown that besides their roles in the reproductive system, E2 and P4 cyclical variations influence other physiological systems, including cardiovascular, respiratory, metabolic and neuromuscular parameters that might lead to significant exercise performance alterations [1].

Women athletes regularly report menstrual cycle-related symptoms, but the real impact of the menstrual cycle phases on their performance is still debated [1,2]. Moreover, it is well known that the different menstrual phase phases (follicular vs. luteal) can specifically influence metabolic and hormonal adaptations during exercise [3]; however, the effects of hormone fluctuations during the menstrual cycle on physical performance are still conflicting. Some studies reported enhanced performance outcomes during the EF [4–6], ovulatory [7] and mid-luteal (ML) phases [8,9], whereas others did not find any difference [10–15]. Furthermore, laboratory and field data are sometimes contradictory [1,16], which makes it difficult to propose evidence-based guidelines for managing exercise performance.

Soccer is an intermittent sport modality characterized by endurance and power/strength loads [17]. Therefore, soccer combines aerobic and anaerobic exercises that may confound the potential influence of sex hormones on overall performance [18]. Surprisingly, studies on the impact of the menstrual phases (i.e., sex hormone variations) on women soccer players' performance are still scarce in the literature. This is important, also because many top-level sportswomen, particularly in soccer, do not take oral contraception. For example, Sundgot-Borgen et al. showed that only 35.8% of Norwegian women soccer players were using oral contraception [19]. Simultaneously, still few young sportswomen use copper intrauterine devices (IUDs), hormonal intrauterine systems (IUSs) or subdermal implants, demonstrating the large share of women with a natural menstrual cycle [20]. Despite this fact, however, to date, only one study evaluated the impact of the menstrual cycle phases on the performance of 15 elite women soccer players during the German national championship (2015–2016) [21]. The authors did not observe any difference in the total distance covered, distance covered at low or high intensity, number of sprints performed, and sprinting distance between follicular and luteal phase, suggesting that the menstrual cycle phases do not significantly alter the aerobic and anaerobic capacities during a soccer game [21]. However, their analysis did not consider separately the EF and LF phases, and this might be a limitation because the EF phase is characterized by low E2 and P4 and the LF phase by high E2 and low P2.

Therefore, the aim of this study was to determine the influence of three menstrual cycle phases (EF, LF, and ML) on the movement patterns of sub-elite women soccer players during competitive matches. We expressed the recorded running performance as the total covered distance, and also according to four standardized running speed ranges. Moreover, we quantified the number of sprints and compared the data collected in the two halves of each match.

2. Materials and Methods

2.1. Study Design

To determine whether a player's movement pattern was affected by the menstrual cycle phases, we recorded each woman's movements during competitive matches of the second French division over three consecutive competitive seasons (2018/19, 2019/20, and 2020/21). Each included soccer player participated in at least three matches for each menstrual cycle phase (3.7 matches \pm 1.2). We then compared the movement data (for the whole match and first and second part) for the three menstrual cycle phases.

2.2. Participants

Forty-two sub-elite women soccer players from the second French division agreed to participate in the study. Participants taking hormonal contraception ($n = 13$, only pill or implant in our population), goalkeepers ($n = 3$) and participants who were unable to play at least three matches in each phase of their cycle (injury, non-selection, substitute, $n = 18$) were excluded from the analysis. Thus, only eight players met the following inclusion criteria: eumenorrheic women soccer players, no use of hormonal contraception (i.e., pill, contraceptive implant) during the last 6 months, and with a regular menstrual cycle (25–

40 days in length). These eight players were included in the study, and their anthropometric and menstrual cycle characteristics are shown in Table 1. All procedures conformed to the standards of the Declaration of Helsinki. All participants provided written, voluntary informed consent before participation. This study was approved by the relevant ethics committee (Comité de Protection des Personnes Ile de France V, n 19.04.24.44735).

Table 1. Women soccer players' characteristics ($n = 8$).

	Mean \pm SD (CV%)
Age (years)	25.7 \pm 3.3 (12.8%)
Height (cm)	167.3 \pm 7.2 (4.3%)
Body mass (kg)	58.9 \pm 6.3 (10.7%)
Body fat (%) ^a	23.0 \pm 2.0 (8.7%)
Menstrual cycle length (days)	30.0 \pm 2.6 (8.7%)

^a Body fat percentage measured from the skinfold method [22]. Coefficient of Variation (CV%) = (Standard Deviation/Mean) \times 100.

2.3. Estimation of the Menstrual Cycle Phases

As weekly measures of urinary luteinizing hormone and serum E2 and P4 concentrations were not possible due to the long study period (3 years) [23–25], we determined the participants' menstrual phase at each match using the calendar-based counting method. During the three seasons, each woman recorded the first day of each cycle (day 1 of the menses). Then, for the first three consecutive menstrual cycles, we determined each participant's mean cycle length as the number of days before the menstruation onset. We assumed that participants had a regular ovulatory menstrual cycle with a 'classical' physiological hormone fluctuation pattern if the standard deviation of each cycle duration was lower than 3 days. Based on the menstruation initiation day and cycle length, we retrospectively classified the matches played by each participant in: the EF phase (menstruation, day 1–4), and LF phase (day 10–13), and ML phase (day 20–23). The days were based on the average 28-day cycle [11].

2.4. Contextual-Related Variables

As contextual-related variables may affect the soccer players' movement patterns [26], we recorded the game location (match at home or away), match outcome (won, drawn, or lost), and quality of opposition (i.e., the differences in ranking and points between the player's team and that of her opponent) (Table 2).

Table 2. Contextual-related variables of soccer games.

		EF	LF	ML	Statistics
Game location	Home	14	14	7	χ^2 (2.72) = 4.71, $p = 0.10$
	Away	9	12	16	
Match Outcome	Won	16	18	14	χ^2 (4.72) = 3.16, $p = 0.53$
	Drawn	7	6	9	
	Lost	0	2	0	
Ranking difference		-4.9 \pm 3.9 (-79%)	-5.08 \pm 4.6 (-90%)	-5.1 \pm 4.5 (-88%)	$p = 0.88$
Point difference		10.5 \pm 9.9 (94%)	11 \pm 10.2 (93%)	10.1 \pm 10.1 (99%)	$p = 0.73$

Ranking difference = Difference between the championship ranking of the player's team and the ranking of her opponents. Values for ranking and point difference are presented as mean \pm SD (CV%). Coefficient of Variation (CV%) = (Standard Deviation/Mean) \times 100.

2.5. Movement Patterns of Each Player

During competition games, players wore on the ankle an inertial measurement unit (Goaltime-Kerilab®, Paris, France) that included a 100 Hz accelerometer and a 100 Hz gyroscope. In this type of device, triaxial accelerometers measure three-dimensional movements and have been used to quantify the external load in team sports [27,28]. Accelerometry workload provides a measure of the total distance and a measure of loads in sports with frequent directional changes [29,30]. The pre-marketing device was carefully tested by the manufacturer. Compared with known distances, its measurement accuracy was higher than 95% and the mean inter- and intra-individual differences in total distance, for each velocity range, were lower than 5%.

Each player used the same device during each recording. We expressed the recorded running performance as the total covered distance (DTOT; m.min⁻¹) and in the four standardized velocity ranges predefined by the device: low velocity (LowV; <7 km.h⁻¹), moderate velocity (ModV; 7 km.h⁻¹–14 km.h⁻¹), high velocity (HighV; 14 km.h⁻¹–19 km.h⁻¹) and sprinting (SprintV; >19 km.h⁻¹). We also counted the number of sprints (1 sprint corresponded to at least 4 strides at >21 km.h⁻¹). We expressed the collected data (i) for each velocity range as the distance covered per minute (m.min⁻¹), and (ii) as the number of sprints per minute [31]. We then averaged the data for each phase (EF, LF, ML), for the whole match and for each half match. We used data originating from a recording that lasted ≥80 min.

2.6. Statistical Analyses

We presented data as the mean ±SD and coefficient of variation (CV%). We checked the data normality using the Shapiro–Wilk’s test. We determined whether the game location and match outcome varied during the menstrual cycle phases (EF, LF, ML) using the Chi-square (χ^2) test. We used linear mixed models to compare the player’s movement patterns and quality of opposition in the function of the menstrual cycle phases (EF, LF, ML) and game period (first, second part). We modeled menstrual cycle phases, the game period and their interaction as fixed effects, and soccer players as random effects. When we detected a significant effect, we adjusted for multiple comparisons using Tukey’s method and computed the Cohen’s d effect size (0.2: small effect; 0.5: moderate effect; 0.8: large; and 1.3 very large effect) [32]. We set the statistical significance at $p < 0.05$. For all statistical analyses, we used the R software (version 4.0.5), and the lme4, nmle and multcomp packages for the linear mixed models [33].

3. Results

3.1. Context of Games and Menstrual Cycle Phase

Game location and outcome, and quality of opposition did not differ between the games from the three menstrual cycle phases ($p > 0.05$, Table 2).

3.2. Match Physical Performance Metrics

No menstrual cycle phase and game period interaction effect was revealed by the linear mixed model. Significant effects of the phases of the menstrual cycle were found for DTOT (m.min⁻¹) ($p = 0.0097$), ModV (m.min⁻¹) ($p = 0.0005$), HighV (m.min⁻¹) ($p = 0.0046$), and the number of sprints (count.min⁻¹, $p = 0.0004$) (Figure 1).

Specifically, DTOT was lower during EF than LF ($p = 0.0048$; $d = 0.78$ (moderate effect)). Similarly, ModV and HighV were significantly lower during EF compared with the LF ($p < 0.001$; $d = 1.03$ (large effect)); and $p = 0.0011$; $d = 0.79$ (moderate effect), respectively) and ML phases ($p = 0.04$; $d = 0.57$ (moderate effect)); and $p = 0.048$; $d = -0.52$ (moderate effect), respectively). The number of sprints was significantly higher in the LF phase than in the EF and ML phases ($p < 0.001$; $d = 0.7$ (moderate effect)); and $p = 0.002$; $d = 0.96$ (large effect), respectively). The LowV ($p = 0.12$) and SprintV ($p = 0.20$) mean values were comparable in the three phases.

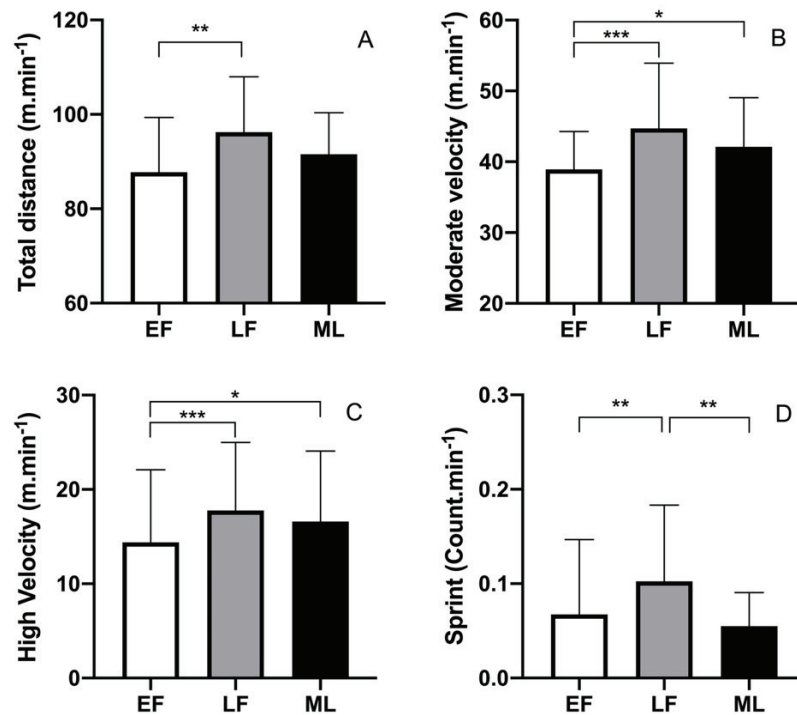


Figure 1. Effects of the menstrual cycle phases on women soccer players’ movement patterns during competitive soccer matches (whole game). (A) Total distance covered per minute (m.min⁻¹); (B) Distance covered at moderate velocity per minute (m.min⁻¹); (C) Distance covered at high velocity per minute (m.min⁻¹); (D) Number of sprints per minute (count.min⁻¹). EF: early follicular; LF: late follicular; ML: mild luteal. * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.

The linear mixed model also showed a significant effect of the game period for DTOT ($p = 0.035$) and LowV ($p = 0.002$). DTOT and LowV were significantly lower in the second part of each game ($d = 1.51$ and $d = 1.367$, very large effects, respectively) (Table 3). Conversely, we did not observe any effect on ModV, HighV or SprintV (Table 3).

Table 3. Total covered distance per minute (DTOT), distance covered per minute at low (LowV), moderate (ModV), high (HighV) velocity, and sprint velocity (SprintV) during the first (1st H) and the second half (2nd H) of competitive soccer matches.

	1st H			2nd H			Linear Mixed Effect: p		
	EF	LF	ML	EF	LF	ML	MC	GP	MC * GP
DTOT (m.min ⁻¹)	89.1 ± 13.7 (15.4%)	98.5 ± 11.9 (12.10%)	92.5 ± 8.3 (9.00%)	85.3 ± 10.3 (12.10%)	91.8 ± 12.3 (13.30%)	89.4 ± 9.7 (10.90%)	0.01	0.03	0.73
LowV (m.min ⁻¹)	34.6 ± 3.1 (9.00%)	34.3 ± 3.4 (9.90%)	33.1 ± 3.5 (10.60%)	33.2 ± 1.8 (5.40%)	31.9 ± 2.0 (6.30%)	31.9 ± 2.9 (9.10%)	0.13	0.004	0.61
ModV (m.min ⁻¹)	39.5 ± 6.2 -15.70%	45.7 ± 9.2 (20.10%)	42.4 ± 6.8 (16.00%)	37.9 ± 5.0 (13.20%)	42.6 ± 9.3 (21.80%)	41.0 ± 7.0 (17.10%)	0.001	0.053	0.77
HighV (m.min ⁻¹)	14.0 ± 7.4 -52.90%	17.0 ± 6.5 (38.20%)	15.8 ± 6.7 (42.40%)	13.3 ± 6.8 (51.10%)	15.9 ± 6.1 (38.40%)	15.3 ± 6.9 (45.10%)	0.005	0.26	0.93
SprintV (m.min ⁻¹)	0.64 ± 0.86 -134.40%	1.12 ± 1.31 (117.00%)	0.95 ± 1.35 (142.10%)	0.60 ± 0.82 (136.70%)	1.06 ± 1.27 (120.00%)	0.92 ± 1.31 (142.40%)	0.21	0.85	0.99

Values are presented as mean ± SD (CV%). Coefficient of Variation (CV%) = (Standard Deviation/Mean) × 100. Significant values are in bold. EF: early follicular; LF: late follicular; ML: mild luteal; MC: menstrual cycle effect; GP: game period effect; MC * GP: menstrual cycle × game period interaction.

4. Discussion

Our study suggests that independently of contextual-related variables (i.e., game location, match outcome and quality of opponents), the EF phase of the menstrual cycle (i.e., the period of the menses) may negatively impact the women soccer players' movement patterns during competitive matches. Indeed, ModV and HighV were lower during the EF than the LF and ML phases, leading to a decrease in the DTOT covered during this period. Moreover, the number of sprints was also reduced during EF compared with LF. As expected, overall DTOT and LowV were lower during the second half of the game, but the match duration did not modify the EF phase influence on women soccer players' performance.

Performance-based research on women soccer players is scarce and, to our knowledge, only one previous study was performed in "ecological" conditions. In this study on 15 elite German women soccer players, the authors compared the impact of the follicular and luteal phases on physical performance during match-play over a 4-month period [21]. Their results suggest that the menstrual cycle phases do not significantly influence the match physical performance, but their conclusions should be interpreted with caution because they did not consider separately the EF and LF phase, and therefore, the potential influence of menstruation was not analyzed separately. Our study is the first to establish that physical performance evaluated during competitive matches may be affected by women soccer players during the menstruation period.

Women soccer players are exposed to specific physical demands during matches that vary according to the game level/standard. Overall, a woman soccer player generally covers around 10 km per match [34], highlighting that soccer athletic performance requires good aerobic capacities. Helgerud et al. [35] demonstrated that the increase in maximal oxygen consumption (VO₂max) in men elite junior soccer players is correlated with the distance covered, work intensity level, number of sprints, and the number of involvements with the ball during matches. Moreover, aerobic endurance, strength, agility, speed and repeated sprint capacity are also important for high-level performance in a soccer match [36]. Speed can be described as the ability to cover a distance in a short time. High-intensity running and sprints are a crucial component in soccer because they represent 22% to 28% of the total distance covered in a match [37], although large fluctuations are noted due to playing position, level of play, surface, or team tactics [38]. Therefore, we decided to calculate the total distance covered during the whole match and during each half period. We also distinguished four velocity ranges to simultaneously cover the aerobic and anaerobic capacities. As the women soccer players did not always play for the entire duration of the match (95 min), we expressed the results as a meter per minute or counts per minute (for the number of sprints).

Female sex hormone (E2 and P4) fluctuations during the menstrual cycle may potentially modulate the energy stores, neuromuscular function, fatigability and recovery. E2 and P4 are both low in the EF, only E2 is high in the LF, and both E2 and P4 are high in the ML phase [3,5]. P4 is known to counteract the E2 effect. Furthermore, the muscle glycogen content in vastus lateralis at rest is higher in the mid-luteal phase than in the mid-follicular phase [39]. After a glycogen depletion session (90 min cycling at 60% of VO₂max followed by four 1-min sprints at 100% VO₂max), muscle glycogen content remains higher during the luteal than follicular phase [40]. These findings suggest that the elevated E2 and P4 plasma concentrations in the luteal phase might promote muscle glycogen storage and sparing during exercise, and this might delay the fatigue onset and facilitate recovery [3,41,42]. Conversely, low E2 and P4 levels (EF) and high E2 levels alone (LF) do not induce such effects [3,41,42]. However, as soccer also requires high-intensity running and sprints, the women's performance could be improved by a large capacity to use glycolysis during the match (if H⁺ and Pi production are well regulated). In our study, we did not detect any difference between the LF and ML phases for any of the measured distances (whatever the velocity range) during the whole match and in two halves. This suggests that the capacity to induce muscle glycogen storage and sparing during the

match in the luteal phase was not efficient, or that the glycolysis activity during LF did not significantly improve performance. This conclusion is in accordance with previous studies that did not observe any significant performance difference between the follicular and luteal phases in women soccer players [43].

Interestingly, our study showed that the EF phase negatively influenced the women soccer players' movement pattern with lower ModV and HighV values compared with the LF and ML phases, leading to a decrease in the DTOT. The number of sprints was also lower during the EF than in the LF phase. High-intensity running and repeated sprint abilities rely not only on glycogen availability and glycolytic enzyme activities but also on neuromuscular features and fatigability. Ovarian hormone fluctuations during the menstrual cycle may influence neural drive, skeletal muscle contractility and fatigability. Studies in animal models reported that E2 binds to muscle α estrogen receptors (ER α) [44] and limits skeletal muscle fatigue in soleus muscles [45]. In humans, it has been shown that the neuromuscular function and fatigability of the knee extensors vary during the menstrual cycle, possibly influencing the exercise performance, as indicated by the higher voluntary activation (assessed by transcranial magnetic stimulation and motor nerve stimulation) during the LF phase and the longer time to task failure during the ML phase [46]. Moreover, the luteal phase has been associated with decreased knee joint valgus angles, suggesting that progesterone might influence knee kinematics and the associated injury risk [47]. However, a recent review reported conflicting results on fatigability during the menstrual cycle [48]. Indeed, half of the studies found that fatigability was lower during the luteal phase, and the other half during the follicular phase. These inconsistencies could be explained by differences in the methodologies used and the skeletal muscles investigated (upper/lower extremities). Concerning the lower extremities, where knee extensors are the muscles more often evaluated, only one study examined the time to task failure in the EF, LF and ML phases, and did not find any significant difference [6]. However, it highlighted a clear trend ($p = 0.061$) for higher maximal voluntary contraction in the EF than ML phase. Thus, it is difficult to explain our results, indicating that low E2 and P4 concentrations may negatively impact soccer performance during competitive matches. However, our findings are in accordance with the meta-analysis by McNulty et al. [1] showing that exercise performance might be slightly reduced during the EF phase of the menstrual cycle, compared with all the other phases. They are also in agreement with other studies in which women athletes stated that their performance is altered during menstruation days [49,50]. Motivation, pain, discomfort and disturbed mood are some of the psychological factors that should be taken into account to explain the lower performance during the EF phase [51,52].

Finally, overall, our findings showed a decrease of the DTOT and of the LowV during the second half period (vs. the first one), but without any menstrual cycle phase \times game period interaction, meaning that the EF negative effect on performance is not counter-balanced by the match duration. This result is in accordance with the recent study by Krstrup et al. [53] showing that match playing in elite women soccer players results in significant glycogen depletion in both muscle fiber types, which may explain the fatigue in the last part of the match. Furthermore, repeated sprint capacity was associated with muscle metabolite perturbation [53].

4.1. Limitations

One of the limitations of this study concerns the absence of sex hormone measurements to validate the different menstrual cycle phases. Although the "calendar cycle tracking method" is the most common method for a long follow-up period, it is not optimal to confirm that women are in the expected menstrual phase [24]. Furthermore, we might have included women with an anovulatory cycle in our study because no ovulation test was carried out [54]. In addition, the limited number of participants and the long study period might restrict our conclusions.

4.2. Future Directions

This study deserves to be reinforced by a larger sample size with women followed over a sporting season. The use of connected devices incorporating GPS could provide additional information. Beyond the three phases studied in this work, the addition of the ovulatory phase could complete these results due to a higher E2/P4 ratio and its impact on energy metabolism and neuromuscular function. Lastly, as many female soccer players use oral contraceptives [55], a comparative population could complement this data.

5. Conclusions

This study was the first to analyze women players' movement patterns during soccer games according to three menstrual cycle phases (early follicular, late follicular, and mid-luteal phases). Our results suggest that the early follicular phase (i.e., menstruation days) may negatively affect performance in sub-elite women soccer players during competitive matches by decreasing the distances covered at different velocities and the sprint number. The playing duration did not modify this effect. These results can be useful for coaches and conditioning staff to optimize the training load and performance of high-level women soccer players.

Author Contributions: Conceptualization, P.-H.I., N.B. and C.M.; methodology, P.-H.I., I.R., N.B. and C.M.; investigation, P.-H.I.; writing—original draft preparation, P.-H.I.; writing—review and editing, P.-H.I., I.R., N.B. and C.M.; supervision, N.B. and C.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This study was carried out within the framework of a CIFRE agreement thesis and was supported by the French National Association for Research and Technology (ANRT).

Institutional Review Board Statement: All procedures conformed to the standards of the Declaration of Helsinki. This study was approved by the relevant ethics committee (Comité de Protection des Personnes Ile de France V, n 19.04.24.44735).

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from all subjects involved in the study.

Data Availability Statement: The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. McNulty, K.L.; Elliott-Sale, K.J.; Dolan, E.; Swinton, P.A.; Ansdell, P.; Goodall, S.; Thomas, K.; Hicks, K.M. The Effects of Menstrual Cycle Phase on Exercise Performance in Eumenorrheic Women: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med.* **2020**, *50*, 1813–1827. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01319-3>.
2. Larsen, B.; Morris, K.; Quinn, K.; Osborne, M.; Minahan, C. Practice does not make perfect: A brief view of athletes' knowledge on the menstrual cycle and oral contraceptives. *J. Sci. Med. Sport* **2020**, *23*, 690–694. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2020.02.003>.
3. Boisseau, N.; Isacco, L. Substrate metabolism during exercise: Sexual dimorphism and women's specificities. *Eur. J. Sport Sci.* **2021**, *17*, 1–21. <https://doi.org/10.1080/17461391.2021.1943713>.
4. Campbell, S.E.; Angus, D.J.; Febbraio, M.A. Glucose kinetics and exercise performance during phases of the menstrual cycle: Effect of glucose ingestion. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* **2001**, *281*, E817–E825. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.2001.281.4.E817>.
5. Pallavi, L.C.; Souza, U.J.D.; Shivaprakash, G. Assessment of Musculoskeletal Strength and Levels of Fatigue during Different Phases of Menstrual Cycle in Young Adults. *J. Clin. Diagn. Res.* **2017**, *11*, CC11–CC13. <https://doi.org/10.7860/JCDR/2017/24316.9408>.
6. Tenan, M.S.; Hackney, A.C.; Griffin, L. Maximal force and tremor changes across the menstrual cycle. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2016**, *116*, 153–160. <https://doi.org/10.1007/s00421-015-3258-x>.
7. Bambaichi, E.; Reilly, T.; Cable, N.T.; Giacomoni, M. The isolated and combined effects of menstrual cycle phase and time-of-day on muscle strength of eumenorrheic females. *Chronobiol. Int.* **2004**, *21*, 645–660. <https://doi.org/10.1081/cbi-120039206>.
8. Oosthuysen, T.; Bosch, A.N.; Jackson, S. Cycling time trial performance during different phases of the menstrual cycle. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2005**, *94*, 268–276. <https://doi.org/10.1007/s00421-005-1324-5>.
9. Ekenros, L.; Hirschberg, A.L.; Heijne, A.; Friden, C. Oral contraceptives do not affect muscle strength and hop performance in active women. *Clin. J. Sport Med.* **2013**, *23*, 202–207. <https://doi.org/10.1097/JSM.0b013e3182625a51>.

10. Dibrezzo, R.; Fort, I.L.; Brown, B. Dynamic strength and work variations during three stages of the menstrual cycle. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* **1988**, *10*, 113–116. <https://doi.org/10.2519/jospt.1988.10.4.113>.
11. De Jonge, X.A.K.J. Effects of the menstrual cycle on exercise performance. *Sports Med.* **2003**, *33*, 833–851. <https://doi.org/10.2165/00007256-200333110-00004>.
12. De Jonge, X.A.K.J.; Boot, C.R.L.; Thom, J.M.; Ruell, P.A.; Thompson, M.W. The influence of menstrual cycle phase on skeletal muscle contractile characteristics in humans. *J. Physiol.* **2001**, *530*, 161–166. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2001.0161m.x>.
13. De Janse, X.A.K.J.; Thompson, M.W.; Chuter, V.H.; Silk, L.N.; Thom, J.M. Exercise performance over the menstrual cycle in temperate and hot, humid conditions. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2012**, *44*, 2190–2198. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3182656f13>.
14. McLay, R.T.; Thomson, C.D.; Williams, S.M.; Rehrer, N.J. Carbohydrate loading and female endurance athletes: Effect of menstrual-cycle phase. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* **2007**, *17*, 189–205. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.17.2.189>.
15. Vaiksaar, S.; Jurimae, J.; Maestu, J.; Purge, P.; Kalytka, S.; Shakhlina, L.; Jurimae, T. No effect of menstrual cycle phase and oral contraceptive use on endurance performance in rowers. *J. Strength Cond. Res.* **2011**, *25*, 1571–1578. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181df7fd2>.
16. Billaut, F.; Bishop, D. Muscle fatigue in males and females during multiple-sprint exercise. *Sports Med.* **2009**, *39*, 257–278. <https://doi.org/10.2165/00007256-200939040-00001>.
17. Stolen, T.; Chamari, K.; Castagna, C.; Wisloff, U. Physiology of soccer: An update. *Sports Med.* **2005**, *35*, 501–536. <https://doi.org/10.2165/00007256-200535060-00004>.
18. Archiza, B.; Andaku, D.K.; Beltrame, T.; Libardi, C.A.; Borghi-Silva, A. The Relationship Between Repeated-Sprint Ability, Aerobic Capacity, and Oxygen Uptake Recovery Kinetics in Female Soccer Athletes. *J. Hum. Kinet.* **2020**, *75*, 115–126. <https://doi.org/10.2478/hukin-2020-0042>.
19. Sundgot-Borgen, J.; Torstveit, M.K. The female football player, disordered eating, menstrual function and bone health. *Br. J. Sports Med.* **2007**, *41* (Suppl. 1), i68–i72. <https://doi.org/10.1136/bjism.2007.038018>.
20. Henderson, Z.J.; Scribbans, T. Intrauterine Contraception and Athletic Performance: Where is the Data? *Health Fit. J. Can.* **2020**, *13*, 37–45. <https://doi.org/10.14288/hfjc.v13i2.308>.
21. Julian, R.; Skorski, S.; Hecksteden, A.; Pfeifer, C.; Bradley, P.S.; Schulze, E.; Meyer, T. Menstrual cycle phase and elite female soccer match-play: Influence on various physical performance outputs. *Sci. Med. Footb.* **2020**, *5*, 97–104. <https://doi.org/10.1080/24733938.2020.1802057>.
22. Durnin, J.V.; Womersley, J. The relationship between skinfold thickness and body fat in adults of middle age. *J. Physiol.* **1969**, *200*, 105P–106P.
23. Schaumberg, M.A.; Jenkins, D.G.; de Janse, X.A.K.J.; Emmerton, L.M.; Skinner, T.L. Oral Contraceptive Use Dampens Physiological Adaptations to Sprint Interval Training. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2017**, *49*, 717–727. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001171>.
24. De Janse, X.A.K.J.; Thompson, B.; Han, A. Methodological Recommendations for Menstrual Cycle Research in Sports and Exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2019**, *51*, 2610–2617. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002073>.
25. Elliott-Sale, K.J.; Minahan, C.L.; de Jonge, X.; Ackerman, K.E.; Sipila, S.; Constantini, N.W.; Lebrun, C.M.; Hackney, A.C. Methodological Considerations for Studies in Sport and Exercise Science with Women as Participants: A Working Guide for Standards of Practice for Research on Women. *Sports Med.* **2021**, *51*, 843–861. <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01435-8>.
26. Diez, A.; Lozano, D.; Arjol-Serrano, J.L.; Mainer-Pardos, E.; Castillo, D.; Torrontegui-Duarte, M.; Nobari, H.; Jaen-Carrillo, D.; Lampre, M. Influence of contextual factors on physical demands and technical-tactical actions regarding playing position in professional soccer players. *BMC Sports Sci. Med. Rehabil.* **2021**, *13*, 157. <https://doi.org/10.1186/s13102-021-00386-x>.
27. Hughes, T.; Jones, R.K.; Starbuck, C.; Sergeant, J.C.; Callaghan, M.J. The value of tibial mounted inertial measurement units to quantify running kinetics in elite football (soccer) players. A reliability and agreement study using a research orientated and a clinically orientated system. *J. Electromyogr. Kinesiol.* **2019**, *44*, 156–164. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2019.01.001>.
28. Murray, A.M.; Varley, M.C. Technology in soccer. In *Elite Soccer Players: Maximizing Performance and Safety*; Curtis, R., Benjamin, C., Huggins, R., Casa, D.J., Ed.; Routledge, Taylor & Francis: New York, NY, USA, 2020; pp. 37–53.
29. Boyd, L.J.; Ball, K.; Aughey, R.J. The reliability of MinimaxX accelerometers for measuring physical activity in Australian football. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2011**, *6*, 311–321. <https://doi.org/10.1123/ijspp.6.3.311>.
30. Polglaze, T.; Dawson, B.; Hiscock, D.J.; Peeling, P. A comparative analysis of accelerometer and time-motion data in elite men's hockey training and competition. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2015**, *10*, 446–451. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2014-0233>.
31. Carling, C.; Le Gall, F.; Dupont, G. Analysis of repeated high-intensity running performance in professional soccer. *J. Sports Sci.* **2012**, *30*, 325–336. <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.652655>.
32. Cohen, J. *Statistical Power Analysis for the Behavioural Sciences*; Associates, L.E., Ed.; Lawrence Erlbaum Associates, Inc.: Hillsdale, NJ, USA, 1988.
33. Hothorn, T.; Bretz, F.; Westfall, P. Simultaneous inference in general parametric models. *Biom. J.* **2008**, *50*, 346–363. <https://doi.org/10.1002/bimj.200810425>.
34. Vescovi, J.D.; Jovanovic, M. Sprint Mechanical Characteristics of Female Soccer Players: A Retrospective Pilot Study to Examine a Novel Approach for Correction of Timing Gate Starts. *Front. Sports Act. Living* **2021**, *3*, 629694. <https://doi.org/10.3389/fspor.2021.629694>.
35. Helgerud, J.; Engen, L.C.; Wisloff, U.; Hoff, J. Aerobic endurance training improves soccer performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2001**, *33*, 1925–1931. <https://doi.org/10.1097/00005768-200111000-00019>.

36. Datson, N.; Hulton, A.; Andersson, H.; Lewis, T.; Weston, M.; Drust, B.; Gregson, W. Applied physiology of female soccer: An update. *Sports Med.* **2014**, *44*, 1225–1240. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0199-1>.
37. Vescovi, J.D.; Favero, T.G. Motion characteristics of women's college soccer matches: Female Athletes in Motion (FAiM) study. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2014**, *9*, 405–414. <https://doi.org/10.1123/IJSPP.2013-0526>.
38. Randell, R.K.; Carter, J.M.; Jeukendrup, A.E.; Lizarraga, M.A.; Yanguas, J.I.; Rollo, I. Fat Oxidation Rates in Professional Soccer Players. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2019**, *51*, 1677–1683. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001973>.
39. Hackney, A.C. Effects of the menstrual cycle on resting muscle glycogen content. *Horm. Metab. Res.* **1990**, *22*, 647. <https://doi.org/10.1055/s-2007-1004994>.
40. Nicklas, B.J.; Hackney, A.C.; Sharp, R.L. The menstrual cycle and exercise: Performance, muscle glycogen, and substrate responses. *Int. J. Sports Med.* **1989**, *10*, 264–269. <https://doi.org/10.1055/s-2007-1024913>.
41. Oosthuysen, T.; Bosch, A.N. The effect of the menstrual cycle on exercise metabolism: Implications for exercise performance in eumenorrhoeic women. *Sports Med.* **2010**, *40*, 207–227. <https://doi.org/10.2165/11317090-000000000-00000>.
42. Devries, M.C.; Hamadeh, M.J.; Phillips, S.M.; Tarnopolsky, M.A. Menstrual cycle phase and sex influence muscle glycogen utilization and glucose turnover during moderate-intensity endurance exercise. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* **2006**, *291*, R1120–R1128. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00700.2005>.
43. De Souza, M.J.; Maguire, M.S.; Rubin, K.R.; Maresh, C.M. Effects of menstrual phase and amenorrhea on exercise performance in runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* **1990**, *22*, 575–580. <https://doi.org/10.1249/00005768-199010000-00006>.
44. Wiik, A.; Ekman, M.; Morgan, G.; Johansson, O.; Jansson, E.; Esbjornsson, M. Oestrogen receptor beta is present in both muscle fibres and endothelial cells within human skeletal muscle tissue. *Histochem. Cell Biol.* **2005**, *124*, 161–165. <https://doi.org/10.1007/s00418-005-0030-z>.
45. Cabelka, C.A.; Baumann, C.W.; Collins, B.C.; Nash, N.; Le, G.; Lindsay, A.; Spangenburg, E.E.; Lowe, D.A. Effects of ovarian hormones and estrogen receptor alpha on physical activity and skeletal muscle fatigue in female mice. *Exp. Gerontol.* **2019**, *115*, 155–164. <https://doi.org/10.1016/j.exger.2018.11.003>.
46. Ansdell, P.; Brownstein, C.G.; Skarabot, J.; Hicks, K.M.; Simoes, D.C.M.; Thomas, K.; Howatson, G.; Hunter, S.K.; Goodall, S. Menstrual cycle-associated modulations in neuromuscular function and fatigability of the knee extensors in eumenorrhoeic women. *J. Appl. Physiol.* **2019**, *126*, 1701–1712. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01041.2018>.
47. Cesar, G.M.; Pereira, V.S.; Santiago, P.R.; Benze, B.G.; da Costa, P.H.; Amorim, C.F.; Serrao, F.V. Variations in dynamic knee valgus and gluteus medius onset timing in non-athletic females related to hormonal changes during the menstrual cycle. *Knee* **2011**, *18*, 224–230. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2010.05.004>.
48. Pereira, H.M.; Larson, R.D.; Bembem, D.A. Menstrual Cycle Effects on Exercise-Induced Fatigability. *Front. Physiol.* **2020**, *11*, 517. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00517>.
49. Findlay, R.J.; Macrae, E.H.R.; Whyte, I.Y.; Easton, C.; Forrest, L.J. How the menstrual cycle and menstruation affect sporting performance: Experiences and perceptions of elite female rugby players. *Br. J. Sports Med.* **2020**, *54*, 1108–1113. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2019-101486>.
50. Armour, M.; Hyman, M.S.; Al-Dabbas, M.; Parry, K.; Ferfolja, T.; Curry, C.; MacMillan, F.; Smith, C.A.; Holmes, K. Menstrual Health Literacy and Management Strategies in Young Women in Australia: A National Online Survey of Young Women Aged 13–25 Years. *J. Pediatr. Adolesc. Gynecol.* **2021**, *34*, 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.jpjag.2020.11.007>.
51. Chrisler, J.C.; Marvan, M.L.; Gorman, J.A.; Rossini, M. Body appreciation and attitudes toward menstruation. *Body Image* **2015**, *12*, 78–81. <https://doi.org/10.1016/j.bodyim.2014.10.003>.
52. Schooler, D.; Ward, L.M.; Merriwether, A.; Caruthers, A.S. Cycles of shame: Menstrual shame, body shame, and sexual decision-making. *J. Sex. Res.* **2005**, *42*, 324–334. <https://doi.org/10.1080/00224490509552288>.
53. Krustrup, P.; Mohr, M.; Nybo, L.; Draganidis, D.; Randers, M.B.; Ermidis, G.; Orntoft, C.; Roddick, L.; Batsilas, D.; Poullos, A.; et al. Muscle metabolism and impaired sprint performance in an elite women's football game. *Scand. J. Med. Sci. Sports* **2021**, 1–12. <https://doi.org/10.1111/sms.13970>.
54. Speroff, L.; Glass, R.H.; Kase, N.G. *Clinical Gynecologic Endocrinology and Infertility*; Wilkins, L.W., Ed.; LWW: Philadelphia, PA, USA, 1999.
55. Elliott-Sale, K.J.; McNulty, K.L.; Ansdell, P.; Goodall, S.; Hicks, K.M.; Thomas, K.; Swinton, P.A.; Dolan, E. The Effects of Oral Contraceptives on Exercise Performance in Women: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Med.* **2020**, *50*, 1785–1812. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01317-5>.

3.1. Objectifs de cette 1ère étude

Au moment où nous avons réalisé cette étude, une seule étude s'était précédemment intéressée à déterminer l'influence du CM sur la performance en match chez des joueuses de football de haut niveau (Julian et coll., 2021). Cette étude, réalisée auprès de 15 joueuses évoluant dans le championnat de première division allemande, démontre qu'il n'existe aucune différence entre la distance parcourue quelle que soit l'intensité des courses (*marche, footing, sprint*) entre la phase folliculaire et la phase lutéale, suggérant ainsi que le CM n'exerce aucune influence. Néanmoins, les auteurs ne se sont intéressés qu'à 2 phases du cycle menstruel, la phase folliculaire et la phase lutéale. Or, on sait qu'au cours de la phase folliculaire, les concentrations en E2 varient considérablement entre le début (FP) et la fin de cette phase (FT), ce qui n'a pas été pris en compte.

En prenant en considération les variations en E2 qui ont lieu au cours de la phase folliculaire, l'objectif de notre étude est de déterminer l'influence de 3 phases du cycle menstruel (FP, FT, ML) sur les distances parcourues, en fonction de la vitesse de course, en match (2^{ème} division du championnat de France) chez des joueuses de football semi-professionnelles durant les saisons 2018/19, 2019/20 et 2020/21.

3.2. Design expérimental

Les dosages sanguins hormonaux ne pouvant être mis en place le jour du match en raison des contraintes logistiques, nous nous sommes donc basés sur la méthode calendaire de suivi menstruel pour déterminer rétrospectivement au début de chaque cycle (jour 1) et pour chaque joueuse : la régularité du cycle, la durée moyenne du cycle, ainsi que les différentes phases. En supposant que chaque joueuse présentait un cycle ovulatoire avec les variations hormonales qui le caractérisent nous avons retenus pour l'analyse les matchs ayant eu lieu au cours de la phase folliculaire précoce (jour 1 à 4 du cycle), de la phase folliculaire tardive (jour 10 à 13 du cycle), et de la phase mi-lutéale (jour 20 à 23).

Au cours de chaque match, les joueuses étaient équipées à la base de la jambe (5 cm au-dessus de la malléole externe) d'un capteur Goaltime-Kerilab© qui leur a été attribué durant tout le protocole. Ce dispositif (centrale inertielle) est constitué d'un accéléromètre et d'un gyroscope tous deux d'une fréquence de 100 Hz qui permettent de mesurer les déplacements dans le plan horizontal. La précision de ce type d'outil est supérieure à 95 % et la moyenne des différences inter- et intra-individuelles sur la distance parcourue en fonction des différents seuils de vitesse est inférieure à 5 %.

Afin de déterminer l'influence du cycle menstruel sur les efforts réalisés en match, nous avons retenus uniquement les données issues des matchs dont le temps de jeu est supérieur à 80 min. Les données

collectées ont été traitées en prenant en compte l'aspect temporel du match (données disponibles pour chaque mi-temps ainsi que pour l'intégralité du match), et ont été rapportées au temps de jeu et exprimées en m/min. Nous avons alors analysé, mi-temps par mi-temps et pour le match en intégralité : la distance totale parcourue par les joueuses (DTOT), la distance parcourue à faible intensité (LowV, $< 7 \text{ km.h}^{-1}$), à intensité modérée (ModV, $7 - 14 \text{ km.h}^{-1}$), à intensité élevée ($14 - 21 \text{ km.h}^{-1}$), en sprint ($> 21 \text{ km.h}^{-1}$) ainsi que le nombre de sprints effectués par les joueuses. Les variables liées au contexte (adversité, localisation, résultat) pouvant également exercer une influence directe sur les efforts réalisés en match (Díez et coll., 2021), nous avons également analysé ces variables afin d'éviter tout biais.

3.3. Résultats

3.3.1. Analyse des variables contextuelles

Les variables contextuelles (adversité, localisation du match et résultat), analysées par le test *Chi-square* (χ^2) ne diffèrent pas en fonction des phases étudiées du cycle menstruel. Le contexte environnemental étant donc identique au cours des différentes phases du CM, on peut légitimement supposer que les variations de performance observées peuvent s'expliquer en partie par l'influence des variations hormonales qui caractérisent le cycle menstruel.

3.3.2. Analyse des facteurs de performance en fonction des variations hormonales

Les principaux résultats de cette étude, obtenus par l'utilisation d'un *modèle linéaire à effets mixtes*, démontrent que la performance est modifiée au cours du cycle menstruel. Tout d'abord, la performance est altérée au cours de la phase FP. La distance parcourue à intensité modérée ($7 - 14 \text{ km.h}^{-1}$) et élevée ($14 - 21 \text{ km.h}^{-1}$) est moindre au cours de cette phase en comparaison avec les phases FT ($p < 0.001$) et ML ($p < 0.05$). Cela suggère que des faibles niveaux de concentration en hormones sexuelles ont un impact sur la performance. Les qualités physiques et également psychologiques (motivation, humeur) sont altérées au cours de cette phase.

En présence d'une forte concentration en E2, nous observons une augmentation significative du nombre de sprints effectuées au cours de la phase FT. Ce résultat suggère que les hormones sexuelles exercent une influence positive sur les qualités physiques, et plus particulièrement le E2. Au cours de cette phase, bien que le nombre de sprints soit plus important, la distance parcourue en sprint n'est pas modifiée. Cela traduit une modification du pattern de course en sprint, induite par la concentration élevée en E2, puisque les joueuses effectuent donc d'avantage de sprints de courtes distances.

3.3.3. Analyse des facteurs de performance en fonction du temps de jeu

La distance totale parcourue par minute est plus faible en seconde mi-temps qu'en première mi-temps. Cet effet « mi-temps » attribuable à la fatigue (centrale et périphérique) est connu en football féminin (Mohr et coll., 2004 ; Krstrup et coll., 2022). Néanmoins, nous pouvons affirmer qu'il n'y a cependant pas d'interaction entre la phase du cycle menstruel et la distance parcourue en fonction des mi-temps, ce qui pourrait suggérer que le CM n'a pas d'effet sur la fatigabilité visible entre la première et la seconde mi-temps au cours d'un match de football.

4. Etude 2 : Les différents effets du cycle menstruel sur les facteurs déterminants de la performance chez des joueuses de football semi-professionnelles

Differential effects of menstrual cycle on key determinants of performance in sub-elite women football players

Pierre-Hugues Igonin, Fabrice Cognasse, Philippe Gonzalo, Rémi Philippot, Isabelle Rogowski, Thomas Sabot, Nathalie Boisseau et Cyril Martin

Soumis dans Science and Medecine in Football

Differential effects of menstrual cycle on key determinants of performance in sub-elite women football players

Authors: Igonin P.H. ^{1,2}, Cognasse F. ³, Gonzalo P. ⁴, Philippot R. ^{1,2,5}, Rogowski I. ¹, Sabot T. ², Boisseau N. ⁶† & Martin C. ¹†

† *These authors contributed equally to this work.*

¹ Laboratoire Inter-universitaire de Biologie de la Motricité (LIBM EA 7424), Université Claude Bernard Lyon I, Lyon, France

² Association Sportive de Saint-Etienne (ASSE), Saint-Etienne, France

³ Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale (INSERM U1059), Université Jean Monnet, Saint-Etienne, France; Etablissement Français du Sang Auvergne-Rhône-Alpes (EFS), Saint-Etienne, France

⁴ Laboratoire de Biochimie Pharmaco-Toxicologie, Centre Hospitalier Universitaire de Saint-Etienne (CHU), Saint-Etienne, France

⁵ Service de Chirurgie Orthopédique, Centre Hospitalier Universitaire de Saint-Etienne (CHU), Saint-Etienne, France

⁶ Laboratoire des Adaptations Métaboliques à l'Exercice en conditions Physiologiques et Pathologiques (AME2P), Université Clermont Auvergne, Clermont-Ferrand, France

Running head (40 char): Menstrual cycle and football performance

Corresponding author: Cyril Martin, Laboratoire Inter-universitaire de Biologie de la Motricité (LIBM EA 7424), Université Claude Bernard Lyon I, Lyon, France

Mail: cyril.martin@univ-lyon1.fr

Abstract : 196 words

Manuscript: 3466 words

Number of figure: 1

Number of table: 2

Funding details: This study was carried out in the framework of a CIFRE agreement thesis and was supported by the French National Association for Research and Technology (ANRT).

Data availability statement: The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

ABSTRACT

The aim of this study was to investigate the influence of the early follicular (FP, *i.e.* menstruation), late follicular (FT), and middle luteal (ML) phases of the menstrual cycle on different factors that determine football performance. To this end, eleven eumenorrheic sub-elite women football players underwent field tests to assess sprint speed, lower extremity power, repeated sprint ability, agility and technical skills at each cycle phase.

The 15-m agility, 15-m ball dribbling, squat jump height, total sprint time [sum of 7 sprints] and decrement score [(mean sprint time/best sprint time × 100) – 100], maximum and mean heart rate, and perceived exertion did not significantly differ among menstrual cycle phases. Conversely, the menstrual cycle phases affected the linear sprint velocity over 10, 20, 30-m distances, as indicated by the lower speed in FP phase vs FT (10-, 20- and 30-m) and in ML phase vs FT (10- and 20-m) ($p < 0.05$). The 40-m sprint velocity was not altered by the menstrual cycle phases.

Overall, our study suggests that sex hormone fluctuations during the menstrual cycle may alter maximum sprint velocity over distances <30 m. Coaches and support staff should consider sex hormone fluctuations during physical preparation and for training management.

Keywords: elite women players, menstrual cycle, performance, sprint velocity.

INTRODUCTION

Football is characterized by a combination of short periods of high intensity activity and longer periods of low-intensity running. The explosive bursts of activity include jumping, kicking, tackling, turning, sprinting, changing pace, and require a high level of muscular power to maintain balance and control of the ball (57). Despite the specific anthropometric and physiological characteristics of women, overall, the factors related to football performance are similar between men and women. The mean distances performed by women elite-level players at high intensity ($18\text{-}24.9\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) and sprint ($>25\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) represent $\sim 5\%$ and $\sim 1\%$ of the total covered distance, respectively (15). Top-level women football players perform 28% more high-velocity running ($18\text{km}\cdot\text{h}^{-1}\text{-}24.9\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) and 24% more sprinting ($>25\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) than moderate-level players (43). Thus, the repeat sprint ability (RSA; *i.e.* neuromuscular recovery skill) within and between the two 45-min halves is an important factor for high-level performance. Football requires also endurance abilities to meet the energy demand throughout the game. Overall, women elite-level players run approximately 10 km during a football game of which 1.53–1.68km are completed at high velocity ($>18\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) for a mean oxygen uptake estimated at 77–80% VO_2max (15). Lastly, technical skills are preponderant in football. On average, players are in possession of the ball for <2 minutes per game (17), thus possibly explaining why each ball lost can condition the match result.

In eumenorrhic women, sex hormones, mainly 17β -oestradiol (E2) and progesterone (P4), fluctuate during the physiological “menstrual cycle”. The effects of such fluctuations on physical performance are still debated. Physical performance may be modified by E2, P4 and/or E2/P4 ratio fluctuations by potentially altering body composition (55), energy storage and substrate oxidation (7), cardiovascular capacities (41), and also neuromuscular properties (32). Most studies on the menstrual cycle effect on the athletic qualities of women football players have been carried out in laboratory, but some investigations are now performed in the field (*i.e.*

in an ecological environment). In the field, Julian et al. (2020) did not observe any difference in the number of sprints, sprinting distance, and total distance covered at low or high intensity between the follicular and luteal phase, suggesting that the menstrual cycle phases do not significantly influence the physical capacities during a football match (40). However, this study did not split the follicular phase into early (i.e. the period of the menses) and late follicular (FP and FT, respectively) phases, and this may limit the study conclusion because these two phases are characterized by different E2 and P4 concentrations. More recently, our team determined the influence of the FP, FT and mid-luteal (ML) phases on the movement patterns of sub-elite women football players during competitive matches (35). Our results demonstrated that independently of contextual-related variables (*i.e.* game location, match outcome, and quality of opponents), the FP phase (menses) negatively affected the women players' movement patterns.

To better understand these results, the aim of the present study was to determine the influence of the FP (*i.e.* menses), FT, and ML on different factors that determine football performance [sprint velocity (0-40m), lower limb power (squat jumps), RSA (5), agility and technical skills (agility and ball dribbling (45))] in sub-elite women football players in an ecological environment. We hypothesized that results would be different in FP and ML due to larger E2, P4 and E2/P4 fluctuations between these phases.

METHODS

Participants

Eleven sub-elite women football players were included in this study (mean age = 26.0 ± 3.7 years; body mass = 62.7 ± 9.9 kg; height = 1.70 ± 0.06 m). They all had played in the French national league for 7.8 ± 3.1 years and trained 554 ± 87 minutes per week (matches not included).

All participants were eumenorrheic and had a regular menstrual cycle in the 3 months before the experiment (28 ± 2 days, extreme values = 26-33 days). Participants had not used any form of hormonal contraception for at least six months. They did not have any illness or disease that could affect performance and/or health, and did not have musculoskeletal injuries in the 3 months before the study. All participants voluntarily signed a written, informed consent before participation. This study was approved by the relevant ethics committee (Comité de Protection des Personnes Ile de France V, n°19.04.24.44735).

Menstrual cycle phase monitoring

Before inclusion, the menstrual cycle length and regularity of each woman were determined using a menstrual cycle diary for three consecutive cycles. Women who reported abnormal menstrual cycle length (<24 days, or >35 days) (41) or menstrual cycle irregularities (variation in menstrual cycle length >3 days) were excluded. The next cycle was modelled to determine the testing days for each phase (36). Experimental sessions were planned according to the three expected phases: the FP, FT, and ML sessions took place between the 1st and the 2nd day, the 11th and the 12th day, and the 21th and the 22nd day of the cycle, respectively (38). E2 and P4 were quantified at each session (*vide infra*) to ensure that the test timing corresponded to the expected menstrual cycle phase (36). To reduce the risk of including non-ovulatory or luteal phase-deficient cycles, a minimum progesterone level of 16 nmol.L^{-1} was required for the ML phase (38).

Experimental sessions

After inclusion and menstrual cycle monitoring, the women soccer players participated in three experimental sessions timed during the FP, FT, and ML phases of their menstrual cycle. Each

session included blood sampling to confirm the cycle phase, anthropometric measurements, and different physical tests described below. Sessions were organized in a randomized order over one or two consecutive cycles and were strictly identical (test attempts, recovery times, test order) and took place at the same time of the day. Participants did not perform any vigorous exercise in the 48 hours before each testing session.

Blood collection and analysis

On the morning of each experimental session (8:30 am), after overnight fasting, a 10 mL venous blood sample was drawn in a semi-supine position from an antecubital vein. Serum E2 concentration was measured using the oestradiol electrochemiluminescence immunoassay (ECLIA) (Roche e801, CEO Roche Diagnostics, Basel, Switzerland) with intra- and inter-assay coefficients of 0.8-1.5% and 5.0-6.8%, respectively. Serum P4 concentration was assessed using a progesterone ECLIA (Roche e801, CEO Roche Diagnostics, Basel, Switzerland) with intra- and inter-assay coefficients of 1.5-1.7% and 5.0-5.0%, respectively. The E2/P4 ratio was calculated.

Anthropometric measurements

Whole body mass (WBM; kg) was measured using an electronic portable scale (Window, Téraillon, France) in a standardized outfit. Total Fat Mass (FM) (%) was determined with the skinfold method described by Durnin and Womersley (18). Total Fat-Free Mass (FFM) was calculated as: $FFM (kg) = WBM (kg) - FM (kg)$.

Physical activity and dietary intake

48h before each experimental sessions, participants were asked to maintain their usual physical activities and diet. To verify that these rules were respected, the level of physical activity was evaluated using the French version of the International Physical Activity Questionnaire – long form (IPAQ) (13) and food intake was recorded and analysed by a dietician using the CIQUAL spreadsheet (24).

Field tests

During each experimental session, women football players performed the tests in a pre-defined order. All field tests were conducted on outside natural turf in similar weather conditions for each participant. If weather was deemed unsuitable (rain, strong wind, or temperature not between 8-25 degrees Celsius), the testing session was cancelled and re-scheduled. Each session started with a standardized “FIFA 11+” football warm-up (*i.e.* running exercises at slow velocity combined with active stretching and controlled contacts with a partner). The running course included six to ten pairs of cones (depending on the number of players) about five to six metres apart (length and width). This was followed by six different sets of strength, balance, and jumping exercises, each with three levels of increasing difficulty. The final part was velocity running combined with football-specific movements with sudden changes in direction (53).

The following physical skills were evaluated:

Planned agility was evaluated without and with the ball (15-m agility test and 15-m ball dribbling test, respectively) as previously described (45). First, the players’ velocity in a 15-m agility run was measured using a photocell gate system (Brower™ Timing TC-System, Utah, USA). Participants started running 3 m behind the initial set of gates. After 3 m of line running, they entered a 3-m slalom section marked by three sticks (1.6 m in height and placed

1.5 m apart), and then cleared a 0.5-m hurdle placed 2 m beyond the third stick. Women finally ran 7 m to break the second set of photocell gates, which stopped the timer. Each woman performed two maximal 15-m agility tests separated by 3 min of passive recovery. The fastest mean velocity achieved was recorded. After 5-min passive recovery, they performed the 15-m ball dribbling test. This test was similar to the 15-m agility test, but women had to dribble a ball while performing the test. After the slalom section, the ball was kicked under the hurdle while the player cleared it. Then, the woman kicked the ball towards either of two small goals placed diagonally 7 m on the left and the right sides of the hurdle, and sprinted to the finish line. Each woman performed two maximal 15-m ball dribbling tests separated by 3 min of passive recovery. The fastest velocity achieved was recorded.

Vertical jump: After 5-min passive recovery, a vertical squat jump, consisting in bending the knees to 90°, stopping for 1–2s, and then jumping as high as possible without knee or trunk countermovement was performed. Women completed two attempts and the best performance was kept for the analysis. Trials were separated by 3 min of passive recovery. Vertical jump elevation was determined using a photocell device (Microgate “Optojump Next”, Bolzano, Italy) connected to a portable computer that estimates jump height from the flight time (2).

Linear sprint velocity: After 5-min of passive recovery, the players’ linear sprint velocity was measured during a 40-m maximal linear sprint. Intermediate times were measured at 10m, 20m, 30m and 40m using photocell gates (Brower™ Timing TC-System, Utah, USA). No starting signal was given and participants could start the sprint when they felt ready. Each woman completed two attempts separated by 3 min of passive recovery, and the best performance was kept for the analysis.

RSA: After 10 min of passive recovery, the RSA test was performed (4). This test consists of seven successive 34.2-m maximal sprints separated by 25s of active recovery

(running). The time for each sprint was recorded with a digital chronometer connected to photoelectric cells (Brower™ Timing TC-System, Utah, USA). as previously described. Total sprint time [sum of 7 sprints] and decrement score [(mean sprint time/best sprint time × 100) – 100], expressed in %] were calculated as previously described (26). Heart rate (HR) was recorded with a HR monitor (Polar RS400, Kempele, Finland) throughout the test. The rate of perceived exertion (RPE) was recorded using the Category Ratio (CR-10) by Borg (perceived exertion rated from 1 to 10) (8) at 30 s after the final sprint of the RSA test.

Statistical analysis

Data are presented as the mean ± SD and coefficient of variation (CV%). The data normality was checked using the Shapiro–Wilk test. Linear mixed models were used to compare the women player’s performance in the different menstrual cycle phases (FP, FT, ML). The menstrual cycle phases were considered the fixed effect, and the football player the random effect. When significant effects were identified, Tukey’s adjustments for multiple comparisons were applied and Cohen’s d effect sizes were computed (0.2 for small effect, 0.5 for moderate effect, and 0.8 for large effect) (12). For all statistical analyses, the R commander software (v4.0.5), and the *lme4*, *nmle*, and *multcomp* packages for linear mixed models (34) were used. The statistical significance was set at $p < 0.05$.

RESULTS

E2, P4 and E2/P4 ratio in the three menstrual cycle phases

Serum E2 and P4 concentrations and E2/P4 ratio significantly differed during the menstrual cycle (phase effect; $p < 0.001$) (Table 1). Serum E2 concentrations were significantly higher in

the FT and ML than FP phase ($p=0.0001$ for both, $d=1.79$ and $d=1.38$, respectively, large effects), but not between FT and ML ($p >0.05$). As expected, serum P4 concentration was higher in the ML phase than in the FP and FT phases ($p <0.0001$; $d=2.96$ and $d=2.88$, respectively, large effects). Consequently, the E2/P4 ratio was significantly higher in the FT than FP and ML phases ($p=0.0001$ for both, $d=1.37$ and $d=1.77$, respectively, large effects).

Anthropometric measurements, physical activity level, and dietary intake

WBM (kg), FM (%), Kg) and FFM did not differ among phases ($p>0.05$, Table 1). Physical activity levels (5388 metabolic equivalent of task, MET-min/week \pm 1952, 4778 MET-min/week \pm 1804, 5673 MET-min/week \pm 2442 for FP, FT and ML, respectively) and food intake (2255 kcal \pm 112, 2096 kcal \pm 442, 2479 kcal \pm 482, for FP, FT and ML, respectively) estimated from food intake diary were not different in the three phases.

Physical skills

The 15-m agility, 15-m ball dribbling results did not differ among menstrual cycle phases and showed a weak variation coefficient (range 4-9%) (Table 2). Similarly, the vertical jump results were not influenced by the menstrual cycle ($p >0.05$, Table 2). Conversely, the linear sprint velocity over 10-, 20- and 30 m ($p<0.05$) different among phases (Figure 1A-C). The 10-, 20- and 30-m sprint velocities were lower in the FP than FT phase ($p<0.05$ for all, $d=0.87$, $d=0.93$ and $d=0.82$, respectively, large effects) and the 10- and 20- sprint velocities were higher in the FT than ML phase ($p<0.05$ for both, $d=0.95$, large effect, and $d=0.75$, moderate effect, respectively). The 40-m sprint velocity was not influenced (Figure 1D).

RSA, total sprint time, decrement score, maximum and mean HR, and RPE did not differ among the menstrual cycle phases (Table 2).

DISCUSSION

The aim of this study was to investigate the influence of the FP, FT, and ML menstrual phases on different factors that determine football performance in eumenorrhic elite women players. The main finding is that agility, vertical jump, RSA and perceived exertion were not affected by the menstrual cycle phases, whereas 10-m, 20-m and 30-m sprint velocity were decreased during FP compared with FT and also during ML compared with FT (but only for 10-m and 20-m sprints).

Several studies assessed the impact of the menstrual cycle on performance, but many are limited by the fact that (i) hormonal fluctuations were not evaluated during each phase, and/or (ii) the menstrual cycle was divided only in two phases (follicular vs luteal) (30), thus not taking into account E2/P4 ratio fluctuations (19). Indeed, the menstrual cycle is characterized by four phases: i) the FP phase (including menstruations) with low E2 and P4 levels, ii) the mid-follicular phase with a progressive rise of E2, iii) the FT also called ovulatory phase, and iv) the ML phase, with high E2 and P4 levels. Although their primary function is to ensure reproduction, E2 and P4 might directly and/or indirectly influence performance by altering the energy metabolism, cardiovascular capacities, neuromuscular function, and skeletal muscle and tendon structures (7, 32, 41). In our study, we took care to measure the serum concentrations of E2 and P4 at each phase. As expected, E2 concentrations were higher in FT and ML than FP, whereas P4 concentrations were lower in FP and FT compared with ML. Moreover, the E2/P4 ratio was lower in ML than FP and FT phases. As WBM, FM, physical activity levels and

dietary intake were not different in the three phases, we are confident that the results presented are explained by sex hormone fluctuations.

Few studies reported a significant influence of the menstrual cycle phase on performance (16, 29, 49), but many others did not (33, 39, 47), probably due to methodological differences (10, 19, 42). Performance in very short and explosive sports seems unchanged by the menstrual cycle phases (39, 54, 60). Our results on vertical squat jump confirm this finding and are consistent with previous studies that did not report lower limb muscle strength alterations during the menstrual cycle using isometric tests (37, 44) or vertical jumps (14, 23, 47).

Different studies demonstrated that short sprint performance (< 60 m) is not altered by the menstrual cycle phases in sports students (63), high-level athletes (14), and football players (9, 23, 39). Conversely, our results showed that linear sprint velocities over short distances (10, 20, and 30 m) were decreased during the FP and ML phases compared with FT. This suggests a better performance during ovulation time, when serum E2 concentrations are the highest and progesterone is low. Besides its anabolic effects on skeletal muscle (3), E2 is a neuroexcitatory hormone that may improve voluntary muscle activation (50, 61). Ansdell et al. (2019) showed that voluntary activation of the knee extensors peaked on day 14 of the menstrual cycle (*i.e.* FT phase) (1). Previous works using transcranial electrical stimulation also found an increase of cortical excitation during the FT phase compared with the FP and luteal phases. Conversely, the luteal phase favoured cortical inhibition (51, 52). Muscle-tendon stiffness variations during the menstrual cycle also may play a role in short sprint velocity. Higher serum E2 concentrations may decrease musculotendinous stiffness by inhibiting collagen synthesis (6, 64). In addition to its role in maintaining joints, musculotendinous stiffness also is implicated in the passive elastic component of muscle contraction mechanisms and is positively correlated with performance in short sprints by improving the elastic energy storage and release (11).

Agility in football involves many skills, including technique (foot placement, in-line lunge movement), strength, power, and running velocity (46, 48). Therefore, changes in any of these qualities can interfere with the overall performance. It has been reported that neuromuscular properties (32), brain function (20, 31) and cognitive performance (59) are modified by the menstrual cycle phases. Therefore, we hypothesized that agility, with and without the ball, could be linked to sex hormone fluctuations. The 15-m agility and 15-m ball dribbling test results did not differ in the three menstrual cycle phases, despite the small to moderate effect sizes and the higher linear sprint velocity during the ovulatory period. This suggests that the contribution of velocity to the agility performance, with and without the ball, is not significant enough and that other parameters, such as technique skills or coordination, might be preponderant.

RSA is primordial for individual performance in team sports, including football (21, 27). It has been shown that moderate and high intensity efforts during football games are influenced by the menstrual cycle phases (35). In this 3-season follow-up study, the authors showed an increase in the number of sprints and distance covered at moderate and high velocity per match during the FT phase compared with the FP and ML phases. This suggests that RSA may be better during FT (*i.e.* during the ovulation period with high E2 levels). Our results do not support this conclusion because neither the total sprint time nor the decrement speed score (*i.e.* fatigue) differed in the three menstrual cycle phases. Sprint-induced fatigability may be related to different factors, including i) limited energy supply and intramuscular accumulation of metabolic by-products, such as hydrogen ions; ii) central factors involving the central nervous system and neural pathways; and iii) peripheral factors related to the intrinsic muscle function besides the neuromuscular junction (22). The relative contribution of each factor to fatigability in women football players has not been elucidated yet (28). It has been suggested that E2 and P4 might modulate the energy metabolism and neuromuscular system by acting on receptor

sites in target tissues, including the central nervous system (56), skeletal muscles and tendon structures (32). However, most studies failed to demonstrate any effect of the menstrual cycle on RSA. Indeed, in accordance with our results, studies performed in active women (58), in women handball players (25), and in women football players (62) did not find any RSA alteration in the different menstrual cycle phases. Overall, it can be hypothesized that for a physical skill as multifactorial as RSA, slight variations during the menstrual cycle in one of the RSA determinants (*e.g.* maximal velocity) are counterbalanced by slight opposite variations in another RSA determinant (*e.g.* aerobic capacity).

One of the limitations of this study concerns the small number of participants that might restrict our conclusions. Moreover, although P4 concentrations suggest that the menstrual cycles were ovulatory, this could have been confirmed using luteinizing hormone urine test strips, as recently recommended (38).

In conclusion, although agility, vertical jump and RSA performance were unaffected by the menstrual cycle phases, sprint velocity over short distances was increased during the FT phase of the menstrual cycle in sub-elite women football players. This suggests that E2 increase in the late follicular phase may positively affect performance in this population. These results could be useful for coaches and conditioning staff to optimize velocity development during football training, as well as for sports where speed is a preponderant quality.

References

1. Ansdell P, Brownstein CG, Skarabot J, Hicks KM, Simoes DCM, Thomas K, Howatson G, Hunter SK, and Goodall S. Menstrual cycle-associated modulations in neuromuscular function and fatigability of the knee extensors in eumenorrheic women. *J Appl Physiol (1985)* 126: 1701-1712, 2019.
2. Bagger M, Petersen PH, and Pedersen PK. Biological variation in variables associated with exercise training. *Int J Sports Med* 24: 433-440, 2003.
3. Baltgalvis KA, Greising SM, Warren GL, and Lowe DA. Estrogen regulates estrogen receptors and antioxidant gene expression in mouse skeletal muscle. *PLoS One* 5: e10164, 2010.
4. Bangsbo J. Fitness training in football: a scientific approach, in: *August Krogh Inst.* University of Copenhagen, 1994.
5. Bangsbo J. The physiology of soccer--with special reference to intense intermittent exercise. *Acta Physiol Scand Suppl* 619: 1-155, 1994.
6. Bell DR, Blackburn JT, Norcross MF, Ondrak KS, Hudson JD, Hackney AC, and Padua DA. Estrogen and muscle stiffness have a negative relationship in females. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 20: 361-367, 2012.
7. Boisseau N and Isacco L. Substrate metabolism during exercise: sexual dimorphism and women's specificities. *European journal of sport science*: 1-21, 2021.
8. Borg G. *Borg's Perceived Exertion and Pain Scales*. Human Kinetics, 1998.
9. Campa F, Levi Micheli M, Pompignoli M, Cannataro R, Gulisano M, Toselli S, Greco G, and Coratella G. The Influence of Menstrual Cycle on Bioimpedance Vector Patterns, Performance, and Flexibility in Elite Soccer Players. *Int J Sports Physiol Perform* 17: 58-66, 2022.
10. Carmichael MA, Thomson RL, Moran LJ, and Wycherley TP. The Impact of Menstrual Cycle Phase on Athletes' Performance: A Narrative Review. *Int J Environ Res Public Health* 18, 2021.
11. Chelly SM and Denis C. Leg power and hopping stiffness: relationship with sprint running performance. *Med Sci Sports Exerc* 33: 326-333, 2001.
12. Cohen J. *Statistical Power Analysis for the Behavioural Sciences*. Hillsdale, NJ, 1988.
13. Craig CL, Marshall AL, Sjostrom M, Bauman AE, Booth ML, Ainsworth BE, Pratt M, Ekelund U, Yngve A, Sallis JF, and Oja P. International physical activity questionnaire: 12-country reliability and validity. *Med Sci Sports Exerc* 35: 1381-1395, 2003.
14. Dasa MS, Kristoffersen M, Ersvaer E, Bovim LP, Bjorkhaug L, Moe-Nilssen R, Sagen JV, and Haukenes I. The Female Menstrual Cycles Effect on Strength and Power Parameters in High-Level Female Team Athletes. *Frontiers in physiology* 12: 600668, 2021.
15. Datson N, Hulton A, Andersson H, Lewis T, Weston M, Drust B, and Gregson W. Applied physiology of female soccer: an update. *Sports Med* 44: 1225-1240, 2014.
16. Davies BN, Elford JC, and Jamieson KF. Variations in performance in simple muscle tests at different phases of the menstrual cycle. *J Sports Med Phys Fitness* 41: 532-537, 1991.

17. Dellal A, Hill-Haas S, Lago-Penas C, and Chamari K. Small-sided games in soccer: amateur vs. professional players' physiological responses, physical, and technical activities. *J Strength Cond Res* 25: 2371-2381, 2011.
18. Durnin JV and Womersley J. The relationship between skinfold thickness and body fat in adults of middle age. *J Physiol* 200: 105P-106P, 1969.
19. Elliott-Sale KJ, Minahan CL, de Jonge X, Ackerman KE, Sipila S, Constantini NW, Lebrun CM, and Hackney AC. Methodological Considerations for Studies in Sport and Exercise Science with Women as Participants: A Working Guide for Standards of Practice for Research on Women. *Sports Med* 51: 843-861, 2021.
20. Fernandez G, Weis S, Stoffel-Wagner B, Tendolkar I, Reuber M, Beyenburg S, Klaver P, Fell J, de Greiff A, Ruhlmann J, Reul J, and Elger CE. Menstrual cycle-dependent neural plasticity in the adult human brain is hormone, task, and region specific. *J Neurosci* 23: 3790-3795, 2003.
21. Gabbett TJ, Wiig H, and Spencer M. Repeated high-intensity running and sprinting in elite women's soccer competition. *Int J Sports Physiol Perform* 8: 130-138, 2013.
22. Gandevia SC. Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev* 81: 1725-1789, 2001.
23. Garcia-Pinillos F, Bujalance-Moreno P, Lago-Fuentes C, Ruiz-Alias SA, Dominguez-Azpiroz I, Mecias-Calvo M, and Ramirez-Campillo R. Effects of the Menstrual Cycle on Jumping, Sprinting and Force-Velocity Profiling in Resistance-Trained Women: A Preliminary Study. *Int J Environ Res Public Health* 18, 2021.
24. Gazan R, Barre T, Perignon M, Maillot M, Darmon N, and Vieux F. A methodology to compile food metrics related to diet sustainability into a single food database: Application to the French case. *Food Chem* 238: 125-133, 2018.
25. Ghazel N, Souissi A, Chtourou H, Aloui G, and Souissi N. The effect of music on short-term exercise performance during the different menstrual cycle phases in female handball players. *Res Sports Med* 30: 50-60, 2022.
26. Girard O, Mendez-Villanueva A, and Bishop D. Repeated-sprint ability - part I: factors contributing to fatigue. *Sports Med* 41: 673-694, 2011.
27. Glaise P, Morel B, Rogowski I, Cornu B, and Martin C. Influence of Repeated-Sprint Ability on the in-Game Activity Profiles of Semiprofessional Rugby Union Players According to Position. *Front Sports Act Living* 4: 857373, 2022.
28. Goncalves L, Clemente FM, Barrera JI, Sarmiento H, Gonzalez-Fernandez FT, Rico-Gonzalez M, and Carral JMC. Exploring the Determinants of Repeated-Sprint Ability in Adult Women Soccer Players. *Int J Environ Res Public Health* 18, 2021.
29. Graja A, Kacem M, Hammouda O, Borji R, Bouzid MA, Souissi N, and Rebai H. Physical, Biochemical, and Neuromuscular Responses to Repeated Sprint Exercise in Eumenorrheic Female Handball Players: Effect of Menstrual Cycle Phases. *J Strength Cond Res* 36: 2268-2276, 2022.
30. Greenhall M, Taipale RS, Ihalainen JK, and Hackney AC. Influence of the Menstrual Cycle Phase on Marathon Performance in Recreational Runners. *Int J Sports Physiol Perform* 16: 601-604, 2021.

31. Halbreich U, Rojansky N, Palter S, Tworek H, Hissin P, and Wang K. Estrogen augments serotonergic activity in postmenopausal women. *Biol Psychiatry* 37: 434-441, 1995.
32. Ham S, Kim S, Choi H, Lee Y, and Lee H. Greater Muscle Stiffness during Contraction at Menstruation as Measured by Shear-Wave Elastography. *The Tohoku journal of experimental medicine* 250: 207-213, 2020.
33. Hertel J, Williams NI, Olmsted-Kramer LC, Leidy HJ, and Putukian M. Neuromuscular performance and knee laxity do not change across the menstrual cycle in female athletes. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 14: 817-822, 2006.
34. Hothorn T, Bretz F, and Westfall P. Simultaneous inference in general parametric models. *Biom J* 50: 346-363, 2008.
35. Igonin PH, Rogowski I, Boisseau N, and Martin C. Impact of the Menstrual Cycle Phases on the Movement Patterns of Sub-Elite Women Soccer Players during Competitive Matches. *Int J Environ Res Public Health* 19, 2022.
36. Janse de Jonge XA. Effects of the menstrual cycle on exercise performance. *Sports Med* 33: 833-851, 2003.
37. Janse de Jonge XA, Boot CR, Thom JM, Ruell PA, and Thompson MW. The influence of menstrual cycle phase on skeletal muscle contractile characteristics in humans. *J Physiol* 530: 161-166, 2001.
38. Janse de Jonge XA, Thompson B, and Han A. Methodological Recommendations for Menstrual Cycle Research in Sports and Exercise. *Med Sci Sports Exerc* 51: 2610-2617, 2019.
39. Julian R, Hecksteden A, Fullagar HH, and Meyer T. The effects of menstrual cycle phase on physical performance in female soccer players. *PLoS One* 12: e0173951, 2017.
40. Julian R, Skorski S, Hecksteden A, Pfeifer C, Bradley PS, Schulze E, and Meyer T. Menstrual cycle phase and elite female soccer match-play: influence on various physical performance outputs. *Science and Medicine in Football* 5: 97-104, 2020.
41. Lebrun CM, McKenzie DC, Prior JC, and Taunton JE. Effects of menstrual cycle phase on athletic performance. *Med Sci Sports Exerc* 27: 437-444, 1995.
42. McNulty KL, Elliott-Sale KJ, Dolan E, Swinton PA, Ansdell P, Goodall S, Thomas K, and Hicks KM. The Effects of Menstrual Cycle Phase on Exercise Performance in Eumenorrhic Women: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med* 50: 1813-1827, 2020.
43. Mohr M, Krustrup P, Andersson H, Kirkendal D, and Bangsbo J. Match activities of elite women soccer players at different performance levels. *J Strength Cond Res* 22: 341-349, 2008.
44. Montgomery MM and Shultz SJ. Isometric knee-extension and knee-flexion torque production during early follicular and postovulatory phases in recreationally active women. *J Athl Train* 45: 586-593, 2010.
45. Mujika I, Santisteban J, Impellizzeri FM, and Castagna C. Fitness determinants of success in men's and women's football. *J Sports Sci* 27: 107-114, 2009.
46. Paul DJ, Gabbett TJ, and Nassis GP. Agility in Team Sports: Testing, Training and Factors Affecting Performance. *Sports Med* 46: 421-442, 2016.

47. Romero-Moraleda B, Coso JD, Gutiérrez-Hellin J, Ruiz-Moreno C, Grgic J, and Lara B. The Influence of the Menstrual Cycle on Muscle Strength and Power Performance. *Journal of human kinetics* 68: 123-133, 2019.
48. Sheppard JM and Young WB. Agility literature review: classifications, training and testing. *J Sports Sci* 24: 919-932, 2006.
49. Sipaviciene S, Daniuseviciute L, Kliziene I, Kamandulis S, and Skurvydas A. Effects of estrogen fluctuation during the menstrual cycle on the response to stretch-shortening exercise in females. *BioMed research international* 2013: 243572, 2013.
50. Smith MJ, Adams LF, Schmidt PJ, Rubinow DR, and Wassermann EM. Effects of ovarian hormones on human cortical excitability. *Ann Neurol* 51: 599-603, 2002.
51. Smith MJ, Keel JC, Greenberg BD, Adams LF, Schmidt PJ, Rubinow DA, and Wassermann EM. Menstrual cycle effects on cortical excitability. *Neurology* 53: 2069-2072, 1999.
52. Smith SS, Woodward DJ, and Chapin JK. Sex steroids modulate motor-correlated increases in cerebellar discharge. *Brain Res* 476: 307-316, 1989.
53. Soligard T, Myklebust G, Steffen K, Holme I, Silvers H, Bizzini M, Junge A, Dvorak J, Bahr R, and Andersen TE. Comprehensive warm-up programme to prevent injuries in young female footballers: cluster randomised controlled trial. *BMJ* 337: a2469, 2008.
54. Somboonwong J, Chutimakul L, and Sanguanrungrasirikul S. Core temperature changes and sprint performance of elite female soccer players after a 15-minute warm-up in a hot-humid environment. *J Strength Cond Res* 29: 262-269, 2015.
55. Stachon AJ. Menstrual Changes in Body Composition of Female Athletes. *Coll Antropol* 40: 111-122, 2016.
56. Stoffel-Wagner B. Neurosteroid metabolism in the human brain. *Eur J Endocrinol* 145: 669-679, 2001.
57. Stolen T, Chamari K, Castagna C, and Wisloff U. Physiology of soccer: an update. *Sports Med* 35: 501-536, 2005.
58. Sunderland C and Nevill M. Effect of the menstrual cycle on performance of intermittent, high-intensity shuttle running in a hot environment. *Eur J Appl Physiol* 88: 345-352, 2003.
59. Sundstrom Poromaa I and Gingnell M. Menstrual cycle influence on cognitive function and emotion processing-from a reproductive perspective. *Frontiers in neuroscience* 8: 380, 2014.
60. Tasmektepligil MY, Agaoglu SA, Türkmen L, and Türkmen M. The motor performance and some physical characteristics of the sportswomen and sedentary lifestyle women during menstrual cycle. *Arch Budo* 6: 195-203, 2010.
61. Tenan MS, Peng YL, Hackney AC, and Griffin L. Menstrual cycle mediates vastus medialis and vastus medialis oblique muscle activity. *Med Sci Sports Exerc* 45: 2151-2157, 2013.
62. Tounsi M, Jaafar H, Aloui A, and Souissi N. Soccer-related performance in eumenorrheic Tunisian high-level soccer players: effects of menstrual cycle phase and moment of day. *J Sports Med Phys Fitness* 58: 497-502, 2018.
63. Tsampoukos A, Peckham EA, James R, and Nevill ME. Effect of menstrual cycle phase on sprinting performance. *Eur J Appl Physiol* 109: 659-667, 2010.

64. Yim J, Petrofsky J, and Lee H. Correlation between Mechanical Properties of the Ankle Muscles and Postural Sway during the Menstrual Cycle. *The Tohoku journal of experimental medicine* 244: 201-207, 2018.

Figure Legend

Figure 1. Menstrual cycle phase effects on linear sprint performance. (A) 10-m mean sprint velocity ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); (B) 20-m mean sprint velocity ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); (C) 30-m mean sprint velocity ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); (D) 40-m mean sprint velocity ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). EF: early follicular; LF: late follicular; ML: mid-luteal.

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$.

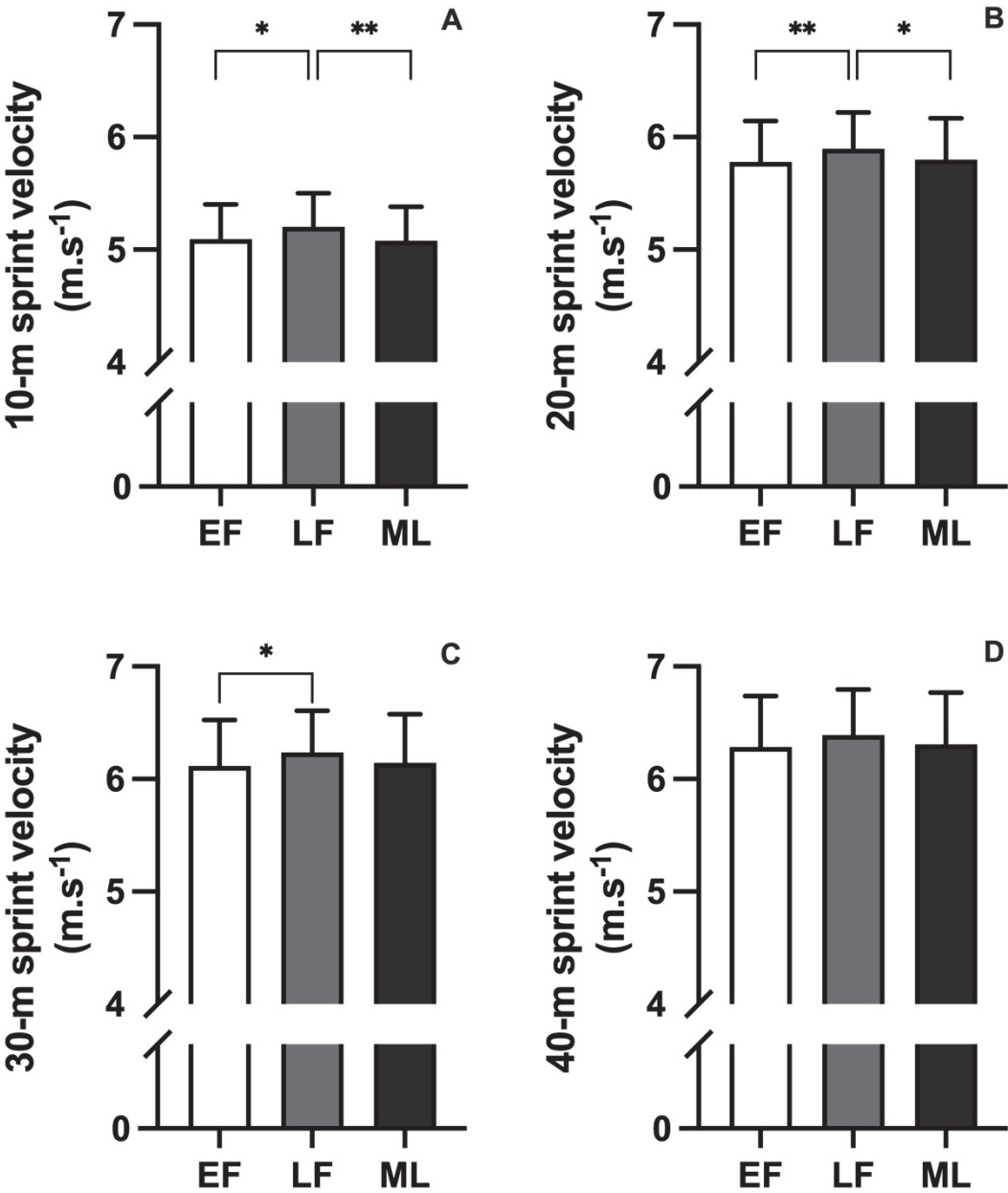


Table 1. Sex hormone concentrations and anthropometric measurements during the menstrual cycle phase

	EF	LF	ML	<i>p</i> -value (effect size)			
				EF vs. LF	EF vs. ML	LF vs. ML	
Sex hormone concentration in serum							
E2 (pmol.L ⁻¹)	130.0 ± 39.2 (30.2 %)	761.8 ± 393.8 (51.7 %)	618.3 ± 157.5 (25.4 %)	0.0001 (0.66)	< 0.0001 (1.79)	< 0.0001 (1.38)	0.40 (0.41)
P4 (nmol.L ⁻¹)	1.4 ± 0.4 (28.6 %)	2.4 ± 1.6 (66.7 %)	41.9 ± 16.1 (38.4 %)	< 0.0001 (0.86)	0.97 (0.08)	< 0.00001 (2.96)	< 0.00001 2.88
E2/P4 ratio	101.7 ± 42.4 (41.7 %)	388.0 ± 239.3 (61.7 %)	16.6 ± 5.7 (34.4 %)	0.0001 (0.66)	< 0.0001 (1.37)	0.40 (0.41)	< 0.0001 (1.77)
Anthropometric measurements							
Whole-body mass (kg)	62.73 ± 10.01 (15.96 %)	62.65 ± 9.93 (15.85 %)	62.67 ± 9.75 (15.55 %)	0.97 (0.004)	0.96 (0.08)	0.98 (0.06)	0.998 (-0.02)
Fat mass (%)	22.40 ± 3.27 (14.59 %)	22.90 ± 3.20 (13.99 %)	22.60 ± 3.21 (14.19 %)	0.15 (0.18)	0.10 (0.62)	0.70 (0.25)	0.43 (0.37)
Fat mass (kg)	14.31 ± 4.18 (29.20%)	14.59 ± 4.24 (29.04 %)	14.40 ± 4.13 (28.66 %)	0.26 (0.13)	0.22 (-0.50)	0.85 (-0.16)	0.50 (0.34)
Fat-free mass (kg)	48.42 ± 6.09 (12.58 %)	48.06 ± 5.98 (12.43 %)	48.27 ± 5.89 (12.20 %)	0.36 (0.10)	0.31 (0.44)	0.82 (0.18)	0.67 (-0.26)

E2: 17β-oestradiol; P4: progesterone; EF: Early Follicular; LF: Late Follicular; ML: Mid-Luteal. Values are presented as mean ± SD (CV%). P-values were determined from the linear mixed effect model.

Table 2. Evaluation of physical skills during the different menstrual cycle phases

	EF	LF	ML	<i>p</i> -value (effect size)	<i>p</i> -value (effect size)		
					EF vs. LF	EF vs. ML	LF vs. ML
Agility							
15-m agility (m.s ⁻¹)	4.26 ± 0.19 (4.54 %)	4.21 ± 0.19 (4.59 %)	4.30 ± 0.18 (4.14 %)	0.23 (0.14)	0.58 (0.30)	0.72 (-0.23)	0.18 (-0.53)
15-m ball dribbling (m.s ⁻¹)	3.11 ± 0.21 (6.62 %)	3.04 ± 0.18 (5.87 %)	3.17 ± 0.29 (9.03 %)	0.13 (0.18)	0.57 (0.31)	0.52 (-0.33)	0.09 (-0.64)
Vertical jumps							
Squat jump height (cm)	26.4 ± 3.6 (13.64 %)	27.8 ± 4.1 (14.75 %)	27.0 ± 3.4 (12.59 %)	0.51 (0.06)	0.71 (0.24)	0.48 (0.35)	0.93 (0.11)
Repeated sprint ability (RSA)							
Total sprint time (s)	51.48 ± 4.55 (8.84 %)	50.83 ± 3.97 (7.81 %)	51.36 ± 4.35 (8.47 %)	0.13 (0.18)	0.12 (0.60)	0.93 (0.11)	0.23 (0.49)
Decrement score (%)	4.1 ± 1.7 (40.34%)	4.8 ± 3.1 (63.51%)	5.1 ± 1.6 (32.04%)	0.45 (0.08)	0.63 (0.28)	0.42 (0.38)	0.94 (0.10)
Maximum HR (bpm)	162 ± 20 (12.35 %)	165 ± 15 (9.09 %)	160 ± 19 (11.88 %)	0.40 (0.09)	0.60 (0.29)	0.92 (0.12)	0.37 (0.41)
Mean HR (bpm)	141 ± 20 (14.18 %)	143 ± 17 (11.89 %)	141 ± 21 (14.89 %)	0.51 (0.07)	0.62 (0.28)	0.99 (0.05)	0.52 (0.33)
RPE	6.8 ± 1.1 (16.18 %)	6.9 ± 1.2 (17.39 %)	7.1 ± 1.2 (16.90 %)	0.79 (0.02)	0.97 (0.07)	0.78 (0.20)	0.90 (0.14)

EF: Early Follicular; LF: Late Follicular; ML: Mid-Luteal; HR: heart rate; RPE: rate of perceived exertion. Values are presented as mean ± SD (CV%). P-values were determined from the linear mixed effect model.

4.1. Objectifs de cette 2ème étude

Afin de déterminer l'influence du CM sur les qualités physiques telles que l'endurance, la vitesse ou encore la capacité à répéter des sprints, qui peuvent - *entre autres* - expliquer les variations de performance en fonction des phases du cycle menstruel en match, il nous a paru judicieux d'étudier de manière indépendante l'impact du cycle menstruel sur les principales qualités physiques mises en jeu en football féminin. Bien que méthodologiquement plus aisés à mettre en place que dans un contexte compétitif, les travaux sur l'influence du cycle menstruel sur les qualités physiques de joueuses de football sont encore peu nombreux.

Parmi les travaux réalisés sur le terrain, Julian et coll. (2017) ont démontré que la performance des 9 joueuses évaluées au cours d'un test intermittent d'endurance (*Yo-Yo IET*) est plus faible au cours de la phase ML qu'au cours de la phase folliculaire. Néanmoins, ils n'observent aucune différence entre la performance réalisée en saut vertical avec contre-mouvement (*CMJ*), ainsi que la performance en sprint linéaire (5, 10, 30 m). Les auteurs, comme ce fut le cas pour l'étude réalisée en match (Julian et coll., 2021), ne se sont intéressés qu'à 2 phases du cycle menstruel, la phase folliculaire (jour 5 à 7) et ML (jour 21 à 22). Or, on sait qu'au cours de la phase folliculaire, les concentrations en E2 varient considérablement et qu'il convient, afin d'étudier la phase folliculaire, de différencier la phase FP (jour 1 à 4) de la phase FT (jour 10 à 14). En prenant en compte cela, une étude a récemment analysé auprès de 20 joueuses élite la performance en sprint linéaire (20 m). Les résultats sont en accord avec les précédentes observations (Julian et coll., 2017), puisque la performance en sprint linéaire demeure inchangée entre le début de la phase folliculaire et la fin de la phase folliculaire, marquée par l'ovulation (Campa et coll., 2021).

Tout en prenant en considération les variations en E2 qui ont lieu au cours de la phase folliculaire, l'objectif de notre étude était de déterminer l'influence de 3 phases du cycle menstruel (FP, FT et ML) sur les qualités physiques déterminantes en football féminin.

4.2. Design expérimental

La régularité du cycle de chaque participante a été analysée durant 3 cycles consécutifs, jusqu'à l'inclusion définitive, sous réserve de présenter un cycle physiologique non-pathologique de 24 à 35 jours (Lebrun et coll., 1995) et régulier (durée du cycle variable à ± 3 jours près). Nous avons alors modélisé et planifié pour chaque participante, en fonction de la durée moyenne de son cycle menstruel, les sessions expérimentales : une session pour chaque phase du cycle.

En s'appuyant sur les concentrations hormonales sanguines en E2 et P4, ainsi que le ratio E2/P4 nous avons retenus 3 phases pour caractériser le cycle menstruel, à savoir la phase FP (jour 1 à 2 du cycle),

la phase FT (jour 11 à 12), et la phase ML (jour 21 à 22). Lors de chaque session expérimentale, des prélèvements sanguins furent effectués dans la veine antécubitale en position semi-allongée afin d'effectuer des dosages hormonaux en E2 et P4 (immunodosages par électro chimioluminescence) pour confirmer que les concentrations hormonales correspondaient aux phases étudiées. De plus, afin de réduire le risque d'inclure des cycles anovulatoires, une concentration minimale de 16 nmol.L⁻¹ était attendue pour la confirmer la phase ML (de Jonge et coll., 2019).

Les sessions expérimentales, rigoureusement identiques, furent randomisées au cours d'un ou deux cycles consécutifs. Les participantes devaient remplir dans les 2 jours qui précédaient chaque session un questionnaire sur leurs habitudes de vie, comprenant une enquête alimentaire ainsi qu'un suivi de l'activité physique. Le jour de la session expérimentale, les prélèvements sanguins étaient réalisés le matin (8h30), puis les participantes étaient convoquées dans l'après-midi (15h30) pour les mesures anthropométriques (poids, évaluation de la masse grasse et détermination de la masse maigre) ainsi que l'évaluation des qualités physiques effectuée sur le terrain (Figure 7).

Pour chaque participante, toutes les sessions expérimentales ont été effectuées dans le même ordre, en extérieur, sur le terrain (pelouse naturelle) et dans des conditions météorologiques similaires. En cas de conditions climatiques difficiles (précipitation, vent, température) ne permettant pas de maintenir la session expérimentale, cette dernière fut annulée et reprogrammée au cours d'un cycle suivant. Dans le cas où des sessions avaient déjà précédemment été effectuées, les données furent détruites afin que les sessions soient effectuées dans l'ordre préalablement défini sur un ou deux cycles consécutifs.

Session expérimentale n°1

J-2, J-1 (pré-test)

Questionnaires sur les habitudes de vie
Suivi alimentaire
Suivi de l'activité physique
Aucun entraînement intense



Jour - J

Prélèvements sanguins
Estradiol, Progesterone
Questionnaires sur les habitudes de vie
Suivi alimentaire et activité physique
Mesures anthropométriques
Poids, taux de masse graisseuse
Tests sur le terrain
Agilité, squat-jumps, sprints linéaires et répétés



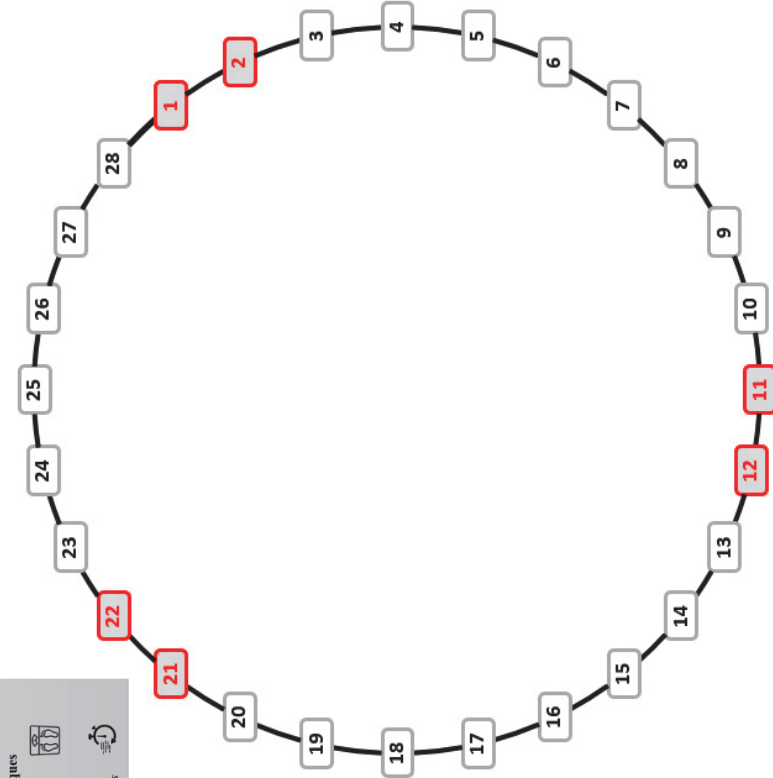
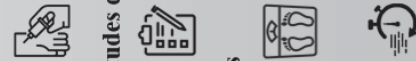
J-2, J-1 (pré-test)

Questionnaires sur les habitudes de vie
Suivi alimentaire
Suivi de l'activité physique
Aucun entraînement intense



Jour - J

Prélèvements sanguins
Estradiol, Progesterone
Questionnaires sur les habitudes de vie
Suivi alimentaire et activité physique
Mesures anthropométriques
Poids, taux de masse graisseuse
Tests sur le terrain
Agilité, squat-jumps, sprints linéaires et répétés



Session expérimentale n°2

J-2, J-1 (pré-test)

Questionnaires sur les habitudes de vie
Suivi alimentaire
Suivi de l'activité physique
Aucun entraînement intense



Jour - J

Prélèvements sanguins
Estradiol, Progesterone
Questionnaires sur les habitudes de vie
Suivi alimentaire et activité physique
Mesures anthropométriques
Poids, taux de masse graisseuse
Tests sur le terrain
Agilité, squat-jumps, sprints linéaires et répétés



Figure 7. Représentation du protocole expérimental de l'étude 2

Après un échauffement standardisé (FIFA 11+) comprenant des exercices de course d'intensité progressive, des exercices de sauts, de changement de direction et des étirements actifs, nous avons évalué les qualités physiques déterminantes en football, à savoir : i. l'agilité planifiée sans puis avec ballon, chronométrée avec des cellules photoélectriques (*15-m agility test* et *15-m ball dribbling test*, (Mujika et coll., 2009)) ; ii. la hauteur de saut en squat-jump à l'aide du système *Optojump* ; iii. la vitesse en sprint linéaire (40 m) chronométrée avec des cellules photoélectriques permettant l'acquisition des temps intermédiaires aux distances de 10, 20 et 30 m. Au cours de ces évaluations, les participantes effectuaient 2 essais, où la meilleure performance était retenue pour l'analyse. Chaque tentative, au cours d'un même test, était entrecoupée de 3 minutes de récupération passive. Entre chaque test une récupération passive de 5 minutes était observée pour les participantes. Enfin, iv. la capacité à réitérer des sprints fût évaluée au cours du *RSA test* (Bangsbo, 1994) qui consiste à répéter 7 sprints de 34,2 m avec changements de direction, entrecoupés de 25 secondes de récupération active. Au cours de cette épreuve, chaque course fût chronométrée afin d'analyser le temps total de course ainsi que la dégradation de la performance ($((\text{temps moyen}/\text{meilleur temps} \times 100) - 100)$, exprimée en %). La FC fut enregistrée durant toute la durée de cette dernière épreuve à l'issue de laquelle les participantes évaluèrent la perception de la difficulté de l'exercice (*RPE*) sur une échelle allant de 0 (aucun effort) à 10 (intensité maximale) (Borg, 1998).

4.3. Résultats

4.3.1. Quantification des variations hormonales

Les prélèvements sanguins ont permis de mettre en évidence des niveaux de concentration hormonale en E2 et P4, et un ratio E2/P4 significativement différents au cours des 3 phases du cycle menstruel. Les concentrations en E2 étaient les plus élevées au cours des phases FT et ML, quant à la concentration en P4 elle était la plus élevée au cours de la phase ML. En conséquence, le ratio E2/P4 était le plus élevé au cours de la phase FT.

4.3.2. Quantification des apports alimentaires et suivi de l'activité physique

Les habitudes alimentaires ainsi que l'activité physique, dans les jours qui précèdent les sessions expérimentales, ne sont pas impactées par les phases du cycle menstruel. Le modèle linéaire à effets mixtes utilisé dans le traitement statistique n'a démontré aucune influence des variations hormonales sur ces variables.

4.3.3. Analyse anthropométrique

Il en est de même concernant les données anthropométriques effectués. Le poids, le taux de masse grasse ainsi que la masse maigre ne sont pas modifiés en fonction du cycle menstruel et variations hormonales associées.

4.3.4. Analyse des performances athlétiques

Les principaux résultats de cette étude mettent en évidence l'influence des phases du cycle menstruel sur les qualités de vitesses de footballeuses évaluées au cours des sprints linéaires. Le *modèle linéaire à effets mixtes* utilisé pour l'analyse des données nous a permis de mettre en évidence qu'au cours de la phase FT les joueuses sont capable de se déplacer à une vitesse de course plus élevée qu'au cours de la phase FP (sur les distances de 10, 20 et 30 m) et ML (sur les distances de 10 et 20 m). Nous observons donc une amélioration de la performance sur les distances de 10 et 20 m au cours de la phase folliculaire tardive en comparaison aux autres phases. Cependant nous pouvons remarquer que cet effet tend à diminuer lorsque la distance de course augmente. En effet, sur une distance de 30 m, cette modification de la performance n'est visible qu'en phase folliculaire. Enfin, sur une distance de 40 m la vitesse de course n'est pas altérée par les différentes phases du cycle menstruel. Ces résultats suggèrent que la phase FT entraîne une amélioration de la vitesse de course des joueuses de football et que cet effet est d'autant plus marqué que la distance à parcourir est courte (10, 20 m vs. 30 m, et 40 m). En match, la littérature montre que la majorité des sprints est effectuée sur de courtes distances, distances majoritairement inférieures à 10 m (Datson et coll., 2017). Ceci renforce donc l'importance de nos résultats.

L'influence du CM sur les qualités physiques déterminantes en football féminin ne s'observe cependant que sur la vitesse de course linéaire. En effet, les autres qualités physiques évaluées que ce soit l'agilité planifiée (avec et sans ballon), la hauteur de saut en squat-jump, la capacité de réitérer les sprints ne sont pas impactées par les différentes phases du cycle menstruel. Enfin les variables telles que la FC et le *RPE* qui permettent une mesure indirecte de la charge interne, ne sont pas modifiées au cours des différentes phases, ce qui suggèrent que le cycle menstruel n'exerce aucune influence sur la charge interne au cours de nos sessions expérimentales.

PARTIE III

CONCLUSION GENERALE,

APPLICATIONS PRATIQUES & PERSPECTIVES

Le cycle menstruel est un mécanisme complexe dans lequel les concentrations en hormones sexuelles fluctuent et interagissent avec de nombreuses fonctions de l'organisme. Bien que leur fonction principale soit d'assurer la reproduction, les principales hormones sexuelles féminines (E2 et P4) pourraient influencer plus ou moins directement les performances athlétiques en modifiant le métabolisme énergétique, les capacités cardiovasculaires, la fonction neuromusculaire et les structures musculaires et tendineuses squelettiques (Boisseau et Isacco, 2022 ; Ham et coll., 2020 ; Lebrun et coll., 1995). De ce fait, les réserves énergétiques et le métabolisme associé, la fonctionnalité neuromusculaire incluant force, puissance et fatigabilité, ou encore la récupération sont autant de déterminants qui exercent une influence directe sur la performance sportive et qui se retrouvent modifiés sous l'influence des fluctuations hormonales durant le cycle menstruel. Plusieurs études ont évalué l'impact du cycle menstruel sur la performance, mais beaucoup sont limitées par le fait que les fluctuations hormonales n'ont pas été évaluées au cours de chaque phase et/ou, le cycle menstruel n'a été subdivisé qu'en deux phases (phases folliculaire et lutéale) (Greenhall et coll., 2021) ne tenant donc pas compte des différentes fluctuations du rapport E2/P4 (Elliott-Sale et coll., 2021). De ce fait, les nombreuses divergences méthodologiques dans ce domaine de recherche n'ont pour l'heure pas permis de dégager un réel consensus scientifique sur le rôle potentiel de ces hormones sur la performance. Les récentes revues de littérature posent dorénavant un cadre méthodologique qu'il convient de respecter afin de pouvoir déterminer et comprendre précisément l'influence, ainsi que le mode d'action, des hormones sexuelles sur les déterminants physiques, métaboliques ou psychologiques de la performance sportive.

1. Synthèse de nos principaux résultats

Les résultats obtenus au cours de *l'étude 1*, permettent de préciser les travaux précédemment menés par Julian et coll (2021). Dans leur étude, les auteurs ont comparé l'impact des phases folliculaire et lutéale de footballeuses sur la performance physique en match. Leurs résultats suggèrent que les phases du cycle menstruel n'influencent pas de manière significative la performance. Leurs conclusions sont toutefois à interpréter avec prudence car ils n'ont pas considéré séparément la phase folliculaire précoce et tardive et, de ce fait, l'influence potentielle des menstruations n'a pas pu être analysée. A notre niveau, nos résultats montrent que la distance totale parcourue en match est plus faible au cours de la phase FP qu'au cours de la FT. Ces résultats confirment donc la nécessité de prendre en compte le début et la fin de la phase folliculaire en raison d'une influence significative du statut hormonal. De plus, nos résultats montrent qu'une diminution des distances parcourues à intensité modérée (7 – 14 km.h⁻¹) et élevée (14 – 21 km.h⁻¹) était observée au cours de la phase FP (menstruations) en comparaison avec les autres phases du cycle menstruel (FT et ML). L'altération des distances de course à des intensités modérées et élevées témoigne de l'impact négatif de la phase FP sur la performance du match. Ce constat vient valider notre hypothèse concernant l'altération de la performance au cours de la phase FP. Ces résultats sont conformes à la méta-analyse de McNulty et coll. (2020), montrant que la performance physique pourrait être légèrement réduite pendant la phase folliculaire précoce du cycle menstruel en comparaison de toutes les autres phases. Nos résultats sont également en accord avec d'autres études dans lesquelles les athlètes féminines ont déclaré percevoir une altération de leur performance durant la période de menstruation (Findlay et coll., 2020 ; Armour et coll., 2020). Au-delà des paramètres neuromusculaires et/ou énergétiques, cette diminution de performance au cours de la phase FP pourrait être également attribuée à des facteurs physiologiques et psychologiques tels que la motivation, des douleurs liées aux menstruations, une perception d'inconfort ou encore des troubles de l'humeur (Chrisler et coll., 2015 ; Schooler et coll., 2005).

En présence de concentrations plasmatiques élevées en E2 et P4, nous avons pu montrer que les distances parcourues à des vitesses modérées et élevées en match au cours des phases FT et ML, sont plus importantes qu'au cours de la FP. Bien que nous n'ayons pu vérifier notre hypothèse sur une amélioration de la performance au cours de la phase ML, nous avons pu mettre en évidence une augmentation significative du nombre de sprints effectués au cours de la phase FT, en comparaison avec les autres phases, bien que la distance parcourue en sprint (> 21 km.h⁻¹) ne fût pas pour autant modifiée. Ces résultats suggèrent que les joueuses effectuent au cours de la phase FT un nombre plus important de sprints de plus courte distance qu'au cours des autres phases du cycle menstruel. Ces résultats sont novateurs puisqu'ils sont les premiers à mettre en évidence un changement du *pattern*

de course en sprint chez des joueuses de football au cours de la phase FT. Ils mettent de plus en avant l'influence bénéfique que peut avoir cette phase (et donc les concentrations élevées en E2) sur la capacité à effectuer et à répéter des courses à des vitesses à la fois modérées, élevée mais également des sprints ce qui peut amener à une amélioration de la performance en football. En effet, on sait que la course à vitesse élevée et les sprints sont des éléments cruciaux en football car ils représentent 22 à 28 % de la distance totale parcourue lors d'un match (Vescovi et Favero, 2014 ; Datson et coll., 2017), bien que de grandes variations soient observées en fonction de la position de la joueuse et du niveau de jeu, de la surface ou encore de la tactique adoptée par l'équipe (Randell et coll., 2019).

Par ailleurs, nous n'avons pas observé de différences entre les phases FT et ML pour aucune des distances mesurées (quelle que soit la plage de vitesse) pendant tout le match et en fonction des mi-temps. Cela suggère que les concentrations élevées en P4 au cours de la phase ML n'ont pas entraîné de modifications physiologiques susceptibles de modifier la performance en match. On sait toutefois que les concentrations plasmatiques élevées d'E2 et de P4 au cours de la phase lutéale pourraient favoriser le stockage et l'épargne du glycogène musculaire pendant l'exercice, ce qui pourrait retarder l'apparition de la fatigue et faciliter la récupération (Boisseau et Isacco, 2022 ; Devries et coll., 2006 ; Oosthuyse et Bosch, 2010). Ce phénomène s'observe également au repos où la concentration en glycogène musculaire du vaste latéral est plus élevée dans la phase mi-lutéale que dans la phase mi-folliculaire (Hackney, 1990). De plus, il a été suggéré que des niveaux élevés en E2 et P4 pourraient moduler le métabolisme énergétique et le système neuromusculaire en agissant sur les sites récepteurs de tissus cibles incluant le système nerveux central (Stoffel-Wagner, 2001), les muscles squelettiques et les structures tendineuses (Ham et coll., 2020). Nos résultats sur l'absence de modification entre la phase FT (concentration élevée en E2 et faible en P4) et la phase ML (concentration élevée en E2 et P4) nous laisse supposer que de faibles variations de capacité de stockage et d'épargne du glycogène musculaire pendant le match ne peuvent contribuer à elles seules à une amélioration de la performance. Nos résultats sont néanmoins conformes aux études antérieures qui n'ont pas observé de différence significative de performance entre les phases folliculaire et lutéale chez les joueuses de football (De Souza et coll., 1990).

Dans le cadre de *l'étude 2*, un suivi de l'alimentation ainsi que du niveau d'activité physique ont été mis en place. De plus, les dosages hormonaux réalisés le jour des sessions expérimentales nous ont permis de confirmer que les concentrations hormonales en E2 et P4 étaient représentatives des phases étudiées. Ainsi, les résultats présentés peuvent être associés aux fluctuations des différentes hormones sexuelles féminines.

Nos résultats nous ont notamment permis de mettre en évidence, l'augmentation de la performance en sprint (linéaire) de 10 et 20 m au cours de la phase FT en comparaison aux autres phases du cycle menstruel. Cette vitesse moyenne de course en sprint, plus élevée au cours de cette phase, est également visible sur 30m en comparaison avec la phase FP uniquement. Nous pouvons ici suggérer que les concentrations élevées en E2 et faibles en P4, caractéristiques de la phase FT, entraînent une amélioration des paramètres neuromusculaires sur des efforts tels que le sprint de courte distance. Comme nous l'avions proposé, les variations hormonales pourraient entraîner une modification de la vitesse de course sur une épreuve de sprints. En effet, outre ses effets anabolisants sur le muscle squelettique (Baltgalvis et coll., 2010), l'E2 est une hormone neuro-excitatrice qui peut améliorer l'activation musculaire volontaire (Smith et coll., 2002 ; Tenan et coll., 2013). Différentes études ont cependant démontré que les performances en sprint sur des courtes distances (0 à 30 m) ne sont pas altérées par les phases du cycle menstruel chez les athlètes de haut niveau (Dasa et coll., 2021) et les joueuses de football (Campa et coll., 2021 ; Garcia-Pinillos et coll., 2021 ; Julian et coll., 2017). Or, la plupart de ces protocoles expérimentaux ne se sont intéressés qu'à 2 phases : les phases folliculaire et ML (Dasa et coll., 2021 ; Julian et coll., 2017) ou FP et FT (Campa et coll., 2021). Le seul protocole au cours duquel les joueuses de football étaient évaluées à 3 reprises (Garcia-Pinillos et coll., 2021) ne présente pas la même temporalité que nos travaux. Les auteurs ont retenu la période de menstruations (jour 1 à 3), la phase folliculaire (jour 7 à 10) et la phase lutéale (jour 19 à 21). Or, on sait que l'activation volontaire des extenseurs du genou culmine à l'approche de l'ovulation (jour 14), soit durant la phase folliculaire tardive (Ansdell et coll., 2019). Des travaux antérieurs utilisant la stimulation électrique transcrânienne ont également révélé une augmentation de l'excitation corticale pendant la phase FT par rapport aux phases folliculaire précoce et mi-lutéale (Smith et coll., 1989 ; Smith et coll., 1999). Au cours des jours 7 à 10 (phase folliculaire), les participantes ne présentaient probablement pas une concentration suffisamment élevée en E2 pour entraîner une modification des paramètres neuromusculaires déterminants en sprint sur une courte distance (5, 10, 15, 20, 25, 30 m).

L'augmentation de la vitesse de sprint sur 10 et 20 m au cours de la phase FT mise en évidence dans notre *étude 2* peut également s'expliquer par des variations d'élasticité du complexe musculo-tendineux au cours du cycle menstruel influençant de ce fait la raideur musculaire. Des concentrations élevées en E2 peuvent en effet augmenter l'élasticité musculo-tendineuse en inhibant la synthèse du collagène (Bell et coll., 2012 ; Yim et coll., 2018). En plus de son rôle dans le maintien des articulations, la raideur musculo-tendineuse est également impliquée dans la composante élastique passive des mécanismes de contraction musculaire et est positivement corrélée à la performance dans les sprints courts en améliorant le stockage et la libération d'énergie élastique (Chelly et Denis, 2001). Néanmoins, sur une épreuve de saut avec contre-mouvement où la raideur musculo-tendineuse joue

un rôle significatif, il est étonnant de voir qu'aucune étude n'a pu mettre en évidence l'influence du cycle menstruel sur la performance (Julian et coll., 2017 ; Giacomoni et coll., 2000). Les performances dans les efforts très courts et explosifs semblent inchangées lors des différentes phases du cycle menstruel (Julian et coll., 2017 ; Somboonwong et coll., 2015 ; Tasmektepligil et coll., 2010). Nos résultats sur le saut vertical en *squat-jump* confirment ce fait et sont cohérents avec les études précédemment citées qui n'ont pas rapporté de modification de la force musculaire des membres inférieurs pendant le cycle menstruel lors de tests isométriques (de Jonge et coll., 2001 ; Montgomery et Shultz, 2010) ou de sauts verticaux (Dasa et coll., 2021 ; Garcia-Pinillos et coll., 2021 ; Romero-Moraleda et coll., 2019).

La performance en agilité est parfois diminuée au cours des menstruations (Sawai et coll., 2018) sous l'effet suggéré d'une légère augmentation du poids attribuée à une rétention d'eau (Lebrun, 1993 ; Sawai et coll., 2018). Or, nous n'avons constaté aucune altération du poids, ni des autres variables anthropométriques au cours du cycle, ce qui peut expliquer la divergence de nos résultats avec certaines études de la littérature. L'agilité implique de nombreuses compétences physiques telles que la force, la puissance et la vitesse de course (Paul et coll., 2016 ; Sheppard et Young, 2006) mais également des compétences perceptivo-cognitives (Paul et coll., 2016). En effet, la performance en agilité s'appuie sur une mise en action du corps en réponse à un stimulus, perçu, analysé et traité, nécessitant de changer de vitesse et de direction. Ainsi, toute altération, aussi minime qu'elle puisse paraître, de l'un de ces paramètres peut interférer avec la performance en agilité. Bien que la vitesse de course en sprint linéaire soit plus élevée au cours de la phase FT, la performance en agilité n'évolue pas. Nos résultats nous laissent suggérer que la contribution des qualités de vitesse à la performance d'agilité, avec et sans le ballon, n'est pas assez significative et que d'autres paramètres tels que la coordination motrice ou encore les compétences perceptivo-décisionnelles pourraient être altérés et venir contrecarrer l'amélioration de la vitesse de course. On sait que des concentrations élevées en E2 entraînent des altérations sur des tâches impliquant les habiletés spatiales (Hampson, 1990). Cette modification des aptitudes cognitives a été peu étudiée dans un contexte sportif mais il est plausible que le cycle menstruel puisse entraîner des altérations de la fonction cognitive (Rosenberg et Park, 2002 ; Sundstrom Poromaa et Gingnell, 2014) pouvant ainsi entraîner des performances différentes sur une épreuve d'agilité.

La capacité à réitérer des sprints est primordiale pour la performance individuelle dans les sports collectifs, y compris le football (Glaise et coll., 2022 ; Gabbett et coll., 2013). Comme nous l'avons montré au cours de *l'étude 1*, les efforts d'intensité modérée et élevée pendant les matchs de football sont influencés par les phases du cycle menstruel. Cela suggère que la capacité à réitérer les sprints pourrait être améliorée au cours de la phase FT sous l'influence des concentrations élevées en E2. Or,

dans notre *étude 2*, nos résultats ne soutiennent pas cette conclusion puisque ni le temps total de sprint au cours de l'épreuve du *RSA test*, ni le pourcentage de diminution des performances en sprints (marqueur de la fatigue) ne diffèrent en fonction des phases du cycle menstruel. Nos résultats sont toutefois en accord avec la littérature scientifique. En effet, les études réalisées auprès de femmes actives (Sunderland et Nevill, 2003), joueuses de handball (Ghazel et coll., 2022) ou encore auprès de footballeuses (Tounsi et coll., 2018) n'ont montré aucune altération de la capacité à réitérer les sprints dans les différentes phases du cycle menstruel. La fatigabilité induite par le sprint peut être liée à différents facteurs, notamment i) l'apport énergétique limité et l'accumulation intramusculaire de sous-produits métaboliques, tels que les ions hydrogène ; ii) les facteurs centraux impliquant le système nerveux central et les voies neuronales ; et iii) les facteurs périphériques liés à la fonction musculaire intrinsèque en plus de la jonction neuromusculaire (Gandevia, 2001). La contribution relative de chaque facteur à la fatigabilité chez les joueuses de football n'a pas encore été élucidée (Goncalves et coll., 2021). Nos résultats montrent que la capacité à réitérer les sprints n'est pas impactée par les variations hormonales, bien que le cycle menstruel exerce une influence sur la vitesse de sprint *per se*. Pour une qualité physique aussi multifactorielle, on peut émettre l'hypothèse que le cycle menstruel puisse agir positivement sur certains déterminants de la capacité à réitérer les sprints contrebalançant par là-même certaines altérations observées en sprint.

Conclusion des études

Le cycle menstruel influe sur la performance chez des joueuses de football semi-professionnelles, aussi bien dans un contexte hors-compétitif tel que peut l'être un entraînement, mais également en match, indépendamment des variables liées à son contexte environnemental (adversité, localisation du match et résultat) dont on connaît l'influence sur la performance (Lago-Peñas et Lago-Ballesteros, 2011). Bien que l'agilité, la performance en saut vertical, la capacité à réitérer des sprints, ou encore la distance parcourue en sprint en match ne soient pas affectées par les phases du cycle menstruel, d'autres paramètres déterminants en football sont modifiés. On observe ainsi une diminution de la distance totale parcourue à intensité modérée et élevée en match au cours de la phase folliculaire précoce (menstruations) qui est caractérisée par des concentrations faibles en hormones sexuelles. A l'inverse, au cours de la phase folliculaire tardive caractérisée par une concentration élevée en E2 et faible en P4, nous observons une amélioration de la vitesse de course sur des sprints de courtes distances (0 à 20 m), mais également sur le nombre de sprints effectués en match. Ces données suggèrent ainsi qu'il existe des liens entre la concentration en E2 et la performance en football. En effet les performances

sont modifiées négativement dès lors que les concentrations en E2 sont faibles. A l'inverse, en présence d'une concentration élevée en E2, la performance en sprint est améliorée. On sait que P4 est connu pour limiter l'effet de E2 (Oosthuyse et Bosch, 2010), ce qui au cours de la phase lutéale, pourrait expliquer nos résultats.

2. Limites de nos études

Le nombre de participantes incluses dans nos 2 études est à prendre en considération (n=8 et 11, respectivement) et peut, en partie, limiter nos conclusions. Les études traitant de l'influence du cycle menstruel auprès de joueuses de football présentent également un nombre faible de participantes compris entre 9 et 26 joueuses (Julian et coll., 2017, 2021 ; Tounsi et coll., 2018 ; Campa et coll., 2021 ; Dos Santos Andrade et coll., 2016). Les femmes sont beaucoup moins incluses dans les protocoles scientifiques, l'une des raisons avancées est la difficulté d'avoir à prendre en compte, ou de chercher à déterminer l'influence du cycle menstruel (Costello et coll., 2014). Pourtant, près de la moitié des femmes actives, sportives, ou sédentaires ont la sensation que leurs entraînements et/ou performances sont modifiés durant le cycle menstruel (Bruinvels et coll., 2016).

Effectuer une recherche dans un contexte compétitif nécessite de devoir faire des choix en prenant en considération des contraintes bien plus complexes que celles observées en laboratoire ou sur le terrain. Le contexte sportif, économique, et logistique ne nous a pas permis d'effectuer des prélèvements sanguins permettant le dosage des concentrations hormonales en E2 et P4 des joueuses avant les matchs. Bien que la « méthode de suivi du cycle calendaire » que nous avons employée soit la méthode la plus courante pour une longue période de suivi, elle ne permet pas de s'assurer que les participantes ont été testées dans les bonnes périodes et au cours de cycles ovulatoires, garants des fluctuations hormonales physiologiques. Ainsi il est possible que des participantes présentant une perturbation de la phase lutéale aient été incluses dans notre analyse. Un test ovulatoire aurait permis de s'assurer que l'ovulation ait bien eu lieu.

3. Applications pratiques

Ces résultats, avec les limites évoquées, mettent en lumière l'influence du cycle menstruel sur la performance de joueuses de football. Ainsi, dans un contexte sportif où le succès se joue sur les moindres détails, il semblerait que le cycle menstruel et le statut hormonal puisse être considéré comme un facteur de performance. Bien qu'il existe des différences interindividuelles dans l'impact et le ressenti que peuvent entraîner les différentes phases du cycle menstruel, la prise en compte des

variations hormonales dans la planification et l'individualisation du travail athlétique pourrait permettre aux entraîneurs et staffs techniques de proposer un contenu athlétique plus efficace et adapté aux spécificités de l'entraînement auprès d'un public féminin. Que ce soit au cours du match où nous avons démontré que le cycle menstruel influence la performance physique, mais également à l'entraînement où la performance en sprint sur de courtes distances est elle aussi influencée. Ces résultats laissent à penser que la vitesse de course pourrait être influencée par le cycle menstruel. Ainsi, nous pouvons penser qu'une planification du développement de la vitesse de course sur de courtes distances puisse être envisagée en intégrant le statut hormonal des joueuses. En revanche en ce qui concerne les autres qualités physiques, l'entraînement périodisé en fonction du statut hormonal ne semble pas être nécessaire pour optimiser les gains et l'efficacité du travail que l'on peut mettre en place auprès de joueuses de football.

Au cours de la phase folliculaire tardive, les distances parcourues à vitesse modérée et élevée sont plus importantes, tout comme le nombre de sprints ainsi que la vitesse en sprint. Cette phase met de façon évidente en lumière l'influence positive qu'exercent les E2 sur la femme sportive. C'est pour cette raison que des protocoles de musculation se sont intéressés à un entraînement périodisé sur le développement des qualités de force des membres inférieurs en se basant sur les phases du cycle menstruel. Avec un même nombre de séances effectuées (10 séances au total), les gains sont plus importants lorsque les séances sont majoritairement effectuées au cours de la phase folliculaire (8 séances en phase folliculaire et 2 en phase lutéale) plutôt que majoritairement effectuées en phase lutéale (8 séances en phase lutéale et 2 en phase folliculaire). Ces gains regroupent à la fois une augmentation de la force isométrique maximale et du diamètre musculaire des extenseurs du genou (Sung et coll., 2014).

Concernant la sélection (ou non-sélection) pour un match d'une joueuse en fonction de son statut hormonal, l'aspect éthique nous amène à être prudent et à nous questionner. Les distances parcourues en matchs à intensité modérée et élevée diffèrent en fonction des phases du cycle menstruel, tout comme le nombre de sprints effectués, ce qui peut potentiellement impacter la performance. Comme nous l'avons évoqué, la performance est avant tout multifactorielle, il est possible qu'une athlète trouve les ressources techniques, tactiques, mentales afin que sa performance ne soit pas altérée au cours de cette phase. Néanmoins, l'entraîneur se doit d'avoir connaissance de ces difficultés afin de pouvoir si besoin les anticiper, comme par exemple envisager un éventuel remplacement au cours du match dans le cas où l'athlète ne parviendrait pas, à elle-seule, à trouver les ressources nécessaires pour compenser les difficultés d'adaptation.

Bien que les athlètes ressentent une diminution de leurs performances au cours des menstruations, nous pouvons penser que la sensibilisation, l'accompagnement et l'optimisation de la récupération et de l'alimentation au cours de cette phase sont des paramètres qui pourraient améliorer le bien-être de l'athlète et limiter le ressenti négatif souvent évoqué au cours de cette phase. De plus, les sportives doivent être performantes peu importe la phase du cycle dans laquelle elles se trouvent. Pour preuve, des records ont été réalisés et des titres olympiques décernés à des sportives au cours de leur période de menstruations, comme dans toutes les autres phases de leur cycle. Pour ces raisons, le staff technique doit être en mesure de pouvoir écouter, sensibiliser et proposer un accompagnement pluridisciplinaire permettant de contrer l'impact négatif que les athlètes associent à cette phase folliculaire précoce.

4. Perspectives du travail

L'impact du cycle menstruel sur la performance en football n'est pas clairement établi. Ainsi il est nécessaire que des nouveaux travaux soient effectués afin de déterminer avec précision l'influence des variations hormonales sur la performance en football féminin. Il convient donc de respecter les recommandations méthodologiques récentes qui permettront une comparaison plus aisée des futurs résultats (Sims et Heather, 2018 ; de Jonge et coll., 2019 ; Elliott-Sale et coll., 2021). En effet, la plupart des recherches publiées présentent d'importantes limites méthodologiques que nous avons évoqué précédemment qui empêchent des conclusions unanimes (Constantini et coll., 2005).

Pour preuve, sur les 18 études réalisées entre 2008 et 2018, i) 9 ne mesurent ni les concentrations sanguines en E2, ni en P ; ii) 2 ne trouvent aucun impact des phases du cycle menstruel sur la performance (Štefanovský et coll., 2016 ; Fazil et coll., 2010) ; iii) 1 démontre l'impact du cycle menstruel sur la force de la jambe non-dominante (Dos Santos Andrade et coll., 2016) ; iv) 1 met en évidence la diminution de la force isométrique maximale au cours de la phase lutéale (Tenan et coll., 2016) ; v) enfin 5 d'entre elles observent des modifications de performance sur les temps de réaction (Kumar et coll., 2013), sur la puissance neuromusculaire (Cook et coll., 2018), la force de préhension (Pallavi et coll., 2017), certains paramètres cardio-respiratoires tels que la ventilation pulmonaire maximale ou encore la $\dot{V}O_{max}$ (Bandyopadhyay & Dalui, 2012) ; et enfin la performance sur 800 et 1500m (Shakhlina et coll., 2016). Ces travaux, bien que récents, mettent en évidence ce besoin d'harmonisation méthodologique puisque ces études ne présentent pas le même niveau de qualité.

Ainsi, en vue d'améliorer la qualité des études, des dosages sanguins hormonaux sont nécessaires et si les contraintes sportives ne permettent pas d'effectuer ce type de mesure, un test ovulatoire sera judicieux puisqu'il permettrait de confirmer l'inclusion de cycles ovulatoires, bien qu'en football les

troubles réguliers et dysfonctionnements du cycle menstruel des joueuses soient assez faibles (9,3%, Sundgot-Borgen et Torstveit, 2007).

Il semblerait également pertinent, au regard du taux élevé d'utilisation des contraceptifs oraux, de considérer les utilisatrices de pilules contraceptives comme une population à part entière, sous réserve de l'utilisation de comprimés répondant aux mêmes normes (pilules minidosées et monophasiques par exemple qui sont les plus représentatives en France). Les femmes utilisant un contraceptif oral pourraient également être considérées comme un groupe « témoin » puisqu'au cours de la prise de comprimés actifs (J1 à 21), les concentrations d'éthinyl-estradiol et de progestatif restent constantes, contrairement aux fluctuations observées chez les femmes euménorhéiques (Rickenlund et coll., 2004 ; Sim et coll., 2017). Les résultats présentés ici, ne sont que les résultats obtenus chez les joueuses euménorrhées. Le protocole a également permis l'inclusion de joueuses utilisant le même type de contraceptif oral (pilule monophasique et minidosée de 2nde génération). Ainsi les données (non traitées) de ces joueuses permettront de déterminer l'influence d'une prise de contraception orale sur la performance en football féminin dans un contexte compétitif et hors compétitif.

Enfin, au regard de nos résultats, l'influence du cycle menstruel sur la performance réalisée au cours de sprints courts, entraîne une altération de la performance au cours des phases FP et ML. Les données enregistrées au cours de notre protocole nous permettront de déterminer si le profil force-vitesse horizontal est également altéré chez des joueuses de football. Bien que la performance en saut soit inchangée au cours du cycle menstruel, les sauts réalisés avec différentes modalités de charge (résultats non présentés) nous permettront également de déterminer le profil force-vitesse vertical. Ces données permettront d'avoir de nouvelles informations sur l'influence que peut avoir le cycle menstruel sur les déterminants neuromusculaires de la performance en football.

Le rôle protecteur de l'E2, pourra également être discuté grâce aux données que nous avons également pu acquérir durant ce travail de thèse. En effet, les dosages sanguins effectués nous permettront de déterminer l'influence du cycle menstruel sur des marqueurs de stress oxydatif et inflammatoires.

PARTIE IV

BIBLIOGRAPHIE

Abdelsattar, M., Konrad, A., & Tilp, M. (2018). Relationship between achilles tendon stiffness and ground contact time during drop jumps. *Journal of sports science & medicine*, 17(2), 223.

Adachi, N., Nawata, K., Maeta, M., & Kurozawa, Y. (2008). Relationship of the menstrual cycle phase to anterior cruciate ligament injuries in teenaged female athletes. *Archives of orthopaedic and trauma surgery*, 128, 473-478.

Ahlborg, G., & Jensen-Urstad, M. (1991). Metabolism in exercising arm vs. leg muscle. *Clinical Physiology*, 11(5), 459-468.

Akturk, M., Toruner, F., Aslan, S., Altinova, A. E., Cakir, N., Elbeg, S., & Arslan, M. (2013). Circulating insulin and leptin in women with and without premenstrual dysphoric disorder in the menstrual cycle. *Gynecological Endocrinology*, 29(5), 465-469.

Althoff, K., Kroiher, J., & Hennig, E. M. (2010). A soccer game analysis of two World Cups: playing behavior between elite female and male soccer players. *Footwear Science*, 2(1), 51-56.

Amelink, G. H., Van der Kallen, C. J., Wokke, J. H., & Bär, P. D. (1990). Dantrolene sodium diminishes exercise-induced muscle damage in the rat. *European journal of pharmacology*, 179(1-2), 187-192.

Amin, Z., Canli, T., & Epperson, C. N. (2005). Effect of estrogen-serotonin interactions on mood and cognition. *Behavioral and cognitive neuroscience reviews*, 4(1), 43-58.

Andersen, T. B., Bendiksen, M., Pedersen, J. M., Ørntoft, C., Brito, J., Jackman, S. R., ... & Krstrup, P. (2012). Kicking velocity and physical, technical, tactical match performance for U18 female football players—effect of a new ball. *Human movement science*, 31(6), 1624-1638.

Anderson, L., Orme, P., Di Michele, R., Close, G. L., Morgans, R., Drust, B., & Morton, J. P. (2016). Quantification of training load during one-, two- and three-game week schedules in professional soccer players from the English Premier League: implications for carbohydrate periodisation. *Journal of sports sciences*, 34(13), 1250-1259.

Andersson, H., Karlsen, A., Blomhoff, R., Raastad, T., & Kadi, F. (2010). Active recovery training does not affect the antioxidant response to soccer games in elite female players. *British journal of nutrition*, 104(10), 1492-1499.

Ansdell, P., Brownstein, C. G., Škarabot, J., Hicks, K. M., Simoes, D. C., Thomas, K., ... & Goodall, S. (2019). Menstrual cycle-associated modulations in neuromuscular function and fatigability of the knee extensors in eumenorrhic women. *Journal of Applied Physiology*, 126(6), 1701-1712.

Armour, M., Parry, K. A., Steel, K., & Smith, C. A. (2020). Australian female athlete perceptions of the challenges associated with training and competing when menstrual symptoms are present. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 15(3), 316-323.

Arnason, A., Sigurdsson, S. B., Gudmundsson, A., Holme, I., Engebretsen, L., & Bahr, R. (2004). Physical fitness, injuries, and team performance in soccer. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 36(2), 278-285.

Aubert, F. (2005). Approche prophylactique de la préparation physique.

Aughey, R. J., Hammond, K., Varley, M. C., Schmidt, W. F., Bourdon, P. C., Buchheit, M., ... & Gore, C. J. (2013). Soccer activity profile of altitude versus sea-level natives during acclimatisation to 3600 m (ISA3600). *British journal of sports medicine*, 47(Suppl 1), i107-i113.

Austin, A. B., Collins, S. M., Huggins, R. A., Smith, B. A., & Bowman, T. G. (2021). The Impact of Environmental Conditions on Player Loads During Preseason Training Sessions in Women's Soccer Athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(10), 2775-2782.

Bäckström, T., Baird, D. T., Bancroft, J., Bixo, M., Hammarbäck, S., Sanders, D., ... & Zetterlund, B. (1983). Endocrinological aspects of cyclical mood changes during the menstrual cycle or the premenstrual syndrome. *Journal of Psychosomatic Obstetrics & Gynecology*, 2(1), 8-20.

Bailey, S. P., Zacher, C. M., & Mittleman, K. D. (2000). Effect of menstrual cycle phase on carbohydrate supplementation during prolonged exercise to fatigue. *Journal of Applied Physiology*, 88(2), 690-697.

Baltgalvis, K. A., Greising, S. M., Warren, G. L., & Lowe, D. A. (2010). Estrogen regulates estrogen receptors and antioxidant gene expression in mouse skeletal muscle. *PLoS one*, 5(4), e10164.

Balsom, P. D., Gaitanos, G. C., Ekblom, B., & Sjödin, B. (1994). Reduced oxygen availability during high intensity intermittent exercise impairs performance. *Acta Physiologica Scandinavica*, 152(3), 279-285.

Bamman, M. M., Hill, V. J., Adams, G. R., Haddad, F., Wetzstein, C. J., Gower, B. A., ... & Hunter, G. R. (2003). Gender differences in resistance-training-induced myofiber hypertrophy among older adults. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 58(2), B108-B116.

Bandyopadhyay, A., & Dalui, R. (2012). Endurance capacity and cardiorespiratory responses in sedentary females during different phases of menstrual cycle. *Kathmandu University Medical Journal*, 10(4), 25-29.

Bangsbo, J. (1994). The physiology of soccer--with special reference to intense intermittent exercise. *Acta physiologica scandinavica. Supplementum*, 619, 1-155.

Bangsbo, J., & Michalsik, L. (2002). Assessment of the physiological capacity of elite soccer players. *Science and football IV*, 53-62.

Bangsbo, J., Mohr, M., Poulsen, A., Perez-Gomez, J., & Krstrup, P. (2006). Training and testing the elite athlete. *J Exerc Sci Fit*, 4(1), 1-14.

Bangsbo, J., Iaia, F. M., & Krstrup, P. (2007). Metabolic response and fatigue in soccer. *International journal of sports physiology and performance*, 2(2), 111-127.

Bär, P. R., Amelink, G. J., Oldenburg, B., & Blankenstein, M. A. (1988). Prevention of exercise-induced muscle membrane damage by oestradiol. *Life sciences*, 42(26), 2677-2681.

Barros, R. P., & Gustafsson, J. Å. (2011). Estrogen receptors and the metabolic network. *Cell metabolism*, 14(3), 289-299.

Beidleman, B. A., Rock, P. B., Muza, S. R., Fulco, C. S., Forte Jr, V. A., & Cymerman, A. (1999). Exercise $\dot{V}e$ and physical performance at altitude are not affected by menstrual cycle phase. *Journal of applied physiology*, 86(5), 1519-1526.

Bell, D. R., Blackburn, J. T., Norcorss, M. F., Ondrak, K. S., Hudson, J. D., Hackney, A. C., & Padua, D. A. (2012). Estrogen and muscle stiffness have a negative relationship in females. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 20, 361-367.

- Bell, D. R., Blackburn, J. T., Hackney, A. C., Marshall, S. W., Beutler, A. I., & Padua, D. A. (2014). Jump-landing biomechanics and knee-laxity change across the menstrual cycle in women with anterior cruciate ligament reconstruction. *Journal of athletic training, 49*(2), 154-162.
- Benjamin, C. L., Hosokawa, Y., Curtis, R. M., Schaefer, D. A., Bergin, R. T., Abegg, M. R., & Casa, D. J. (2020). Environmental conditions, preseason fitness levels, and game workload: analysis of a female NCAA DI national championship soccer season. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 34*(4), 988-994.
- Benoit, V., Valette, A., Mercier, L., Meignen, J. M., & Boyer, J. (1982). Potentiation of epinephrine-induced lipolysis in fat cells from estrogen-treated rats. *Biochemical and biophysical research communications, 109*(4), 1186-1191.
- Bergström, M., Rosvold, M., & Sæther, S. A. (2023). "I hardly have a problem [...] I have my period quite rarely too": Female football players' and their coaches' perceptions of barriers to communication on menstrual cycle. *Frontiers in Sports and Active Living, 5*, 1127207.
- Bernardes, R. P., & Radomski, M. W. (1998). Growth hormone responses to continuous and intermittent exercise in females under oral contraceptive therapy. *European journal of applied physiology and occupational physiology, 79*, 24-29.
- Bethea, C. L., Gundlach, C., & Mirkes, S. J. (2000, June). Ovarian steroid action in the serotonin neural system of macaques. In *Neuronal and Cognitive Effects of Oestrogens: Novartis Foundation Symposium 230* (Vol. 230, pp. 112-133). Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Beynon, B. D., Johnson, R. J., Braun, S., Sargent, M., Bernstein, I. M., Skelly, J. M., & Vacek, P. M. (2006). The relationship between menstrual cycle phase and anterior cruciate ligament injury: a case-control study of recreational alpine skiers. *The American journal of sports medicine, 34*(5), 757-764.
- Bigland-Ritchie, B., Rice, C. L., Garland, S. J., & Walsh, M. L. (1995). Task-dependent factors in fatigue of human voluntary contractions. *Fatigue: Neural and muscular mechanisms, 361-380*.
- Bishop, D., Girard, O., & Mendez-Villanueva, A. (2011). Repeated-sprint ability—part II: recommendations for training. *Sports medicine, 41*, 741-756.
- Bishop, D. J., & Girard, O. (2013). Determinants of team-sport performance: implications for altitude training by team-sport athletes. *British journal of sports medicine, 47*(Suppl 1), i17-i21.
- Blackstock, C. D., Higashi, Y., Sukhanov, S., Shai, S. Y., Stefanovic, B., Tabony, A. M., ... & Delafontaine, P. (2014). Insulin-like growth factor-1 increases synthesis of collagen type I via induction of the mRNA-binding protein LARP6 expression and binding to the 5' stem-loop of COL1a1 and COL1a2 mRNA. *Journal of Biological Chemistry, 289*(11), 7264-7274.
- Blum, I., Vered, Y., Lifshitz, A., Harel, D., Blum, M., Nordenberg, Y., ... & Graff, E. (1996). The effect of estrogen replacement therapy on plasma serotonin and catecholamines of postmenopausal women. *Israel journal of medical sciences, 32*(12), 1158-1162.
- Bohner, J. D., Hoffman, J. R., McCormack, W. P., Scanlon, T. C., Townsend, J. R., Stout, J. R., ... & Fukuda, D. H. (2015). Moderate altitude affects high intensity running performance in a collegiate women's soccer game. *Journal of human kinetics, 47*(1), 147-154.
- Bogdanis, G. C., Nevill, M. E., Lakomy, H. K. A., & Boobis, L. H. (1998). Power output and muscle metabolism during and following recovery from 10 and 20 s of maximal sprint exercise in humans. *Acta Physiologica Scandinavica, 163*(3), 261-272.
- Boisseau, N., & Isacco, L. (2022). Substrate metabolism during exercise: Sexual dimorphism and women's specificities. *European journal of sport science, 22*(5), 672-683.

- Boksem, M. A., & Tops, M. (2008). Mental fatigue: costs and benefits. *Brain research reviews*, 59(1), 125-139.
- Borg, G. (1998). *Borg's perceived exertion and pain scales*. Human kinetics.
- Boss, L., Kang, D. H., Marcus, M., & Bergstrom, N. (2014). Endogenous sex hormones and cognitive function in older adults: a systematic review. *Western journal of nursing research*, 36(3), 388-426.
- Bozzini, B. N., McFadden, B. A., Walker, A. J., & Arent, S. M. (2020). Varying Demands and Quality of Play Between In-Conference and Out-of-Conference Games in Division I Collegiate Women's Soccer. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 34(12), 3364-3368.
- Bradley, P. S., Dellal, A., Mohr, M., Castellano, J., & Wilkie, A. (2014). Gender differences in match performance characteristics of soccer players competing in the UEFA Champions League. *Human movement science*, 33, 159-171.
- Bridgeman, J. T., Zhang, Y., Donahue, H., Wade, A. M., & Juliano, P. J. (2010). Estrogen receptor expression in posterior tibial tendon dysfunction: a pilot study. *Foot & ankle international*, 31(12), 1081-1084.
- Brooks, G. A., & Mercier, J. (1994). Balance of carbohydrate and lipid utilization during exercise: the "crossover" concept. *Journal of applied physiology*, 76(6), 2253-2261.
- Bruinvels, G., Burden, R., Brown, N., Richards, T., & Pedlar, C. (2016). The prevalence and impact of heavy menstrual bleeding (menorrhagia) in elite and non-elite athletes. *PLoS One*, 11(2), e0149881.
- Bruinvels, G., Burden, R. J., McGregor, A. J., Ackerman, K. E., Dooley, M., Richards, T., & Pedlar, C. (2017). Sport, exercise and the menstrual cycle: where is the research?. *British Journal of Sports Medicine*, 51(6), 487-488.
- Brukner, P., & Khan, K. (2010). *Clinical Sports Medicine Third Revised Edition*.
- Bryant, A. L., Clark, R. A., Bartold, S., Murphy, A., Bennell, K. L., Hohmann, E., ... & Crossley, K. M. (2008). Effects of estrogen on the mechanical behavior of the human Achilles tendon in vivo. *Journal of Applied Physiology*, 105(4), 1035-1043.
- Burrows, M., & Bird, S. R. (2005). Velocity at $\dot{V}O_2$ max and peak treadmill velocity are not influenced within or across the phases of the menstrual cycle. *European journal of applied physiology*, 93, 575-580.
- Buttifant, D., Graham, K., & Cross, K. (2001). 55 agility and speed in soccer players are two different performance parameters. *Science and football IV*, 4.
- Cabelka, C. A., Baumann, C. W., Collins, B. C., Nash, N., Le, G., Lindsay, A., ... & Lowe, D. A. (2019). Effects of ovarian hormones and estrogen receptor α on physical activity and skeletal muscle fatigue in female mice. *Experimental gerontology*, 115, 155-164.
- Campa, F., Micheli, M. L., Pompignoli, M., Cannataro, R., Gulisano, M., Toselli, S., ... & Coratella, G. (2021). The influence of menstrual cycle on bioimpedance vector patterns, performance, and flexibility in elite soccer players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 17(1), 58-66.
- Campbell, S. E., & Febbraio, M. A. (2001). Effect of ovarian hormones on mitochondrial enzyme activity in the fat oxidation pathway of skeletal muscle. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 281(4), E803-E808.
- Campbell, S. E., & Febbraio, M. A. (2002). Effect of the ovarian hormones on GLUT4 expression and contraction-stimulated glucose uptake. *American Journal of Physiology-Endocrinology And Metabolism*, 282(5), E1139-E1146.
- Camporez, J. P. G., Jornayvaz, F. R., Lee, H. Y., Kanda, S., Guigni, B. A., Kahn, M., ... & Shulman, G. I. (2013). Cellular mechanism by which estradiol protects female ovariectomized mice from high-fat diet-induced hepatic and muscle insulin resistance. *Endocrinology*, 154(3), 1021-1028.

- Campos, C., Casali, K. R., Baraldi, D., Conzatti, A., Araújo, A. S. D. R., Khaper, N., ... & Belló-Klein, A. (2014). Efficacy of a low dose of estrogen on antioxidant defenses and heart rate variability. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 2014.
- Candolfi, M., Jaita, G., Zaldivar, V., Zarate, S., Ferrari, L., Pisera, D., ... & Seilicovich, A. (2005). Progesterone antagonizes the permissive action of estradiol on tumor necrosis factor- α -induced apoptosis of anterior pituitary cells. *Endocrinology*, 146(2), 736-743.
- Carling, C., Dupont, G., & Le Gall, F. (2011). The effect of a cold environment on physical activity profiles in elite soccer match-play. *International journal of sports medicine*, 542-545.
- Carmichael, M. A., Thomson, R. L., Moran, L. J., & Wycherley, T. P. (2021). The impact of menstrual cycle phase on athletes' performance: a narrative review. *International journal of environmental research and public health*, 18(4), 1667.
- Carson, J. A., & Manolagas, S. C. (2015). Effects of sex steroids on bones and muscles: Similarities, parallels, and putative interactions in health and disease. *Bone*, 80, 67-78.
- Carter, S., McKenzie, S., Mourtzakis, M., Mahoney, D. J., & Tarnopolsky, M. A. (2001). Short-term 17 β -estradiol decreases glucose Ra but not whole body metabolism during endurance exercise. *Journal of Applied Physiology*, 90(1), 139-146.
- Casal, C. A., Maneiro, R., Ardá, A., & Losada, J. L. (2019). Gender differences in technical-tactical behaviour of Laliga Spanish football teams.
- Casazza, G. A., Jacobs, K. A., Suh, S. H., Miller, B. F., Horning, M. A., & Brooks, G. A. (2004). Menstrual cycle phase and oral contraceptive effects on triglyceride mobilization during exercise. *Journal of Applied Physiology*, 97(1), 302-309.
- Casey, E., Hameed, F., & Dhaher, Y. Y. (2014). The muscle stretch reflex throughout the menstrual cycle. *Medicine and science in sports and exercise*, 46(3), 600.
- Chabbert-Buffeta, N., Skinner, D. C., Caraty, A., & Bouchard, P. (2000). Neuroendocrine effects of progesterone. *Steroids*, 65(10-11), 613-620.
- Chaouachi, A., Manzi, V., Wong, D. P., Chaalali, A., Laurencelle, L., Chamari, K., & Castagna, C. (2010). Intermittent endurance and repeated sprint ability in soccer players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(10), 2663-2669.
- Chelly, S. M., & Denis, C. (2001). Leg power and hopping stiffness: relationship with sprint running performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(2), 326-333.
- Chidi-Ogbolu, N., & Baar, K. (2019). Effect of estrogen on musculoskeletal performance and injury risk. *Frontiers in physiology*, 9, 1834.
- Chrisler, J. C., Marván, M. L., Gorman, J. A., & Rossini, M. (2015). Body appreciation and attitudes toward menstruation. *Body Image*, 12, 78-81.
- Clarkson, P. M., Nosaka, K., & Braun, B. (1992). Muscle function after exercise-induced muscle damage and rapid adaptation. *Medicine and science in sports and exercise*, 24(5), 512-520.
- Clarkson, P. M., & Hubal, M. J. (2001). Are women less susceptible to exercise-induced muscle damage?. *Current opinion in clinical nutrition & metabolic care*, 4(6), 527-531.
- Collins, B. C., Arpke, R. W., Larson, A. A., Baumann, C. W., Xie, N., Cabelka, C. A., ... & Lowe, D. A. (2019). Estrogen regulates the satellite cell compartment in females. *Cell reports*, 28(2), 368-381.

Cometti, 1988 – Les méthodes modernes de musculation, compte rendu du colloque de novembre 1988 à l'UFR STAPS de Dijon. Ed : Université de Bourgogne, 1988. Tome 1 données théoriques

Constantini, N. W., Dubnov, G., & Lebrun, C. M. (2005). The menstrual cycle and sport performance. *Clinics in sports medicine*, 24(2), e51-e82.

Cook, C. J., Kilduff, L. P., & Crewther, B. T. (2018). Basal and stress-induced salivary testosterone variation across the menstrual cycle and linkage to motivation and muscle power. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 28(4), 1345-1353.

Costello, J. T., Bieuzen, F., & Bleakley, C. M. (2014). Where are all the female participants in sports and exercise medicine research?. *European journal of sport science*, 14(8), 847-851.

Crowninshield, R. D., & Brand, R. A. (1981). A physiologically based criterion of muscle force prediction in locomotion. *Journal of biomechanics*, 14(11), 793-801.

Cui, Q., Dighe, A. S., & Irvine Jr, J. N. (2013). Combined angiogenic and osteogenic factor delivery for bone regenerative engineering. *Current pharmaceutical design*, 19(19), 3374-3383.

D'Eon, T. M., Sharoff, C., Chipkin, S. R., Grow, D., Ruby, B. C., & Braun, B. (2002). Regulation of exercise carbohydrate metabolism by estrogen and progesterone in women. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 283(5), E1046-E1055.

D'Eon, T. A. R. A., SOUZA, S., & Greenberg, A. (2005). Estrogen regulates lipolysis and perilipin expression by decreasing adiposity and adipocyte size in paired ovariectomized mice. *Journal of Federation of American Societies for Experimental Biology*, (A131), 3.

D'Eon, T. M. (2006). *Estrogen regulation of adiposity: In vivo and in vitro effects on adipose tissue and muscle metabolism*. Tufts University.

Dadgostar, H., Razi, M., Aleyasin, A., Alenabi, T., & Dahaghin, S. (2009). The relation between athletic sports and prevalence of amenorrhea and oligomenorrhea in Iranian female athletes. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 1, 1-7.

Dasa, M. S., Kristoffersen, M., Ersvær, E., Bovim, L. P., Bjørkhaug, L., Moe-Nilssen, R., ... & Haukenes, I. (2021). The female menstrual cycles effect on strength and power parameters in high-level female team athletes. *Frontiers in physiology*, 12, 600668.

Datson, N., Hulton, A., Andersson, H., Lewis, T., Weston, M., Drust, B., & Gregson, W. (2014). Applied physiology of female soccer: an update. *Sports medicine*, 44, 1225-1240.

Datson, N., Drust, B., Weston, M., Jarman, I. H., Lisboa, P. J., & Gregson, W. (2017). Match physical performance of elite female soccer players during international competition. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 31(9), 2379-2387.

Datson, N., Drust, B., Weston, M., & Gregson, W. (2019). Repeated high-speed running in elite female soccer players during international competition. *Science and Medicine in Football*, 3(2), 150-156.

Davis, J. A., & Brewer, J. (1993). Applied physiology of female soccer players. *Sports Medicine*, 16, 180-189.

De Jonge, X. J., Boot, C. R. L., Thom, J. M., Ruell, P. A., & Thompson, M. W. (2001). The influence of menstrual cycle phase on skeletal muscle contractile characteristics in humans. *The Journal of physiology*, 530(Pt 1), 161.

De Jonge, X. A. J. (2003). Effects of the menstrual cycle on exercise performance. *Sports medicine*, 33, 833-851.

- De Jonge, X.A.J., Thompson, M. W., Chuter, V. H., Silk, L. N., & Thom, J. M. (2012). Exercise performance over the menstrual cycle in temperate and hot, humid conditions. *Medicine and science in sports and exercise*, 44(11), 2190-2198.
- De Jonge, X. J., Thompson, B., & Han, A. (2019). Methodological Recommendations for Menstrual Cycle Research in Sports and Exercise. *Medicine and science in sports and exercise*, 51(12), 2610-2617.
- De Souza, M. J., Maguire, M. S., Rubin, K. R., & Maresh, C. M. (1990). Effects of menstrual phase and amenorrhea on exercise performance in runners. *Medicine and science in sports and exercise*, 22(5), 575-580.
- De souza, A., Tochigi, Y., Kavaliova, N., Zaboronok, A., Warashina, Y., Mathis, B. J., ... & Watanabe, K. (2018). MRI reveals menstrually-related muscle edema that negatively affects athletic agility in young women. *Plos one*, 13(1), e0191022.
- Del Vecchio, A., Casolo, A., Negro, F., Scorcelletti, M., Bazzucchi, I., Enoka, R., ... & Farina, D. (2019). The increase in muscle force after 4 weeks of strength training is mediated by adaptations in motor unit recruitment and rate coding. *The Journal of physiology*, 597(7), 1873-1887.
- Devries, M. C., Hamadeh, M. J., Graham, T. E., & Tarnopolsky, M. A. (2005). 17 β -estradiol supplementation decreases glucose rate of appearance and disappearance with no effect on glycogen utilization during moderate intensity exercise in men. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 90(11), 6218-6225.
- Devries, M. C., Hamadeh, M. J., Phillips, S. M., & Tarnopolsky, M. A. (2006). Menstrual cycle phase and sex influence muscle glycogen utilization and glucose turnover during moderate-intensity endurance exercise. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*.
- Diaz, A. M. R. L., Laufer, M. R., & Breech, L. L. (2006). Menstruation in girls and adolescents: using the menstrual cycle as a vital sign. *Pediatrics*, 118(5), 2245-2250.
- Dieli-Conwright, C. M., Spektor, T. M., Rice, J. C., & Schroeder, E. T. (2009). Hormone therapy attenuates exercise-induced skeletal muscle damage in postmenopausal women. *Journal of applied physiology*, 107(3), 853-858.
- Díez, A., Lozano, D., Arjol-Serrano, J. L., Mainer-Pardos, E., Castillo, D., Torrontegui-Duarte, M., ... & Lampre, M. (2021). Influence of contextual factors on physical demands and technical-tactical actions regarding playing position in professional soccer player
- Dokumacı, B., & Hazır, T. (2019). Effects of the menstrual cycle on running economy: oxygen cost versus caloric cost. *Research Quarterly For Exercise And Sport*, 90(3), 318-326.
- Dombovy, M. L., Bonekat, H. W., Williams, T. J., & Staats, B. A. (1987). Exercise performance and ventilatory response in the menstrual cycle. *Medicine and science in sports and exercise*, 19(2), 111-117.
- Dos Santos Andrade, M., Mascarin, N. C., Foster, R., de Jarmy di Bella, Z. I., Vancini, R. L., & Barbosa de Lira, C. A. (2016). Is muscular strength balance influenced by menstrual cycle in female soccer players?. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 57(6), 859-864.
- Dragoo, J. L., Castillo, T. N., Braun, H. J., Ridley, B. A., Kennedy, A. C., & Golish, S. R. (2011). Prospective correlation between serum relaxin concentration and anterior cruciate ligament tears among elite collegiate female athletes. *The American journal of sports medicine*, 39(10), 2175-2180.
- Dufour, 2004 – La Force. Cours de DESS « Préparation physique et Management des équipes sportives », 2004
- Durnin, J. V., & Womersley, J. (1969). The relationship between skinfold thickness and body fat in adults of middle age. *The Journal of physiology*, 200(2), 105P-106P.

- Dye, L., & Blundell, J. E. (1997). Menstrual cycle and appetite control: implications for weight regulation. *Human reproduction (Oxford, England)*, 12(6), 1142-1151.
- Edge, J., Bishop, D., Hill-Haas, S., Dawson, B., & Goodman, C. (2006). Comparison of muscle buffer capacity and repeated-sprint ability of untrained, endurance-trained and team-sport athletes. *European journal of applied physiology*, 96(3), 225-234.
- Eiling, E., Bryant, A. L., Petersen, W., Murphy, A., & Hohmann, E. (2007). Effects of menstrual-cycle hormone fluctuations on musculotendinous stiffness and knee joint laxity. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy*, 15, 126-132.
- Elia, M., Khan, K., Calder, G., & Kurpad, A. (1993). Glycerol exchange across the human forearm assessed by a combination of tracer and arteriovenous exchange techniques. *Clinical Science*, 84(1), 99-104.
- Elkind-Hirsch, K. E., Sherman, L. D., & Malinak, R. (1993). Hormone replacement therapy alters insulin sensitivity in young women with premature ovarian failure. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 76(2), 472-475.
- Elliott-Sale, K., Ross, E., Burden, R., & Hicks, K. (2020). The BASES expert statement on conducting and implementing female athlete based research. *The Sport and Exercise Scientist*, (65), 6-7.
- Elliott-Sale, K. J., Minahan, C. L., de Jonge, X. A. J., Ackerman, K. E., Sipilä, S., Constantini, N. W., ... & Hackney, A. C. (2021). Methodological considerations for studies in sport and exercise science with women as participants: a working guide for standards of practice for research on women. *Sports Medicine*, 51(5), 843-861.
- Ellis, G. S., Lanza-Jacoby, S., Gow, A., & Kendrick, Z. V. (1994). Effects of estradiol on lipoprotein lipase activity and lipid availability in exercised male rats. *Journal of Applied Physiology*, 77(1), 209-215.
- Emmonds, S., Heyward, O., & Jones, B. (2019). The challenge of applying and undertaking research in female sport. *Sports medicine-open*, 5, 1-4.
- Enea, C., Boisseau, N., Ottavy, M., Mulliez, J., Millet, C., Ingrand, I., ... & Dugué, B. (2009). Effects of menstrual cycle, oral contraception, and training on exercise-induced changes in circulating DHEA-sulphate and testosterone in young women. *European journal of applied physiology*, 106, 365-373.
- Enns, D. L., & Tiidus, P. M. (2008). Estrogen influences satellite cell activation and proliferation following downhill running in rats. *Journal of applied physiology*, 104(2), 347-353.
- Enns, D. L., & Tiidus, P. M. (2010). The influence of estrogen on skeletal muscle: sex matters. *Sports medicine*, 40, 41-58.
- Enoka, R. M., Trayanova, N., Laouris, Y., Bevan, L., Reinking, R. M., & Stuart, D. G. (1992). Fatigue-related changes in motor unit action potentials of adult cats. *Muscle & nerve*, 15(2), 138-150.
- Enoka, R. M., & Duchateau, J. (2008). Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function. *The Journal of physiology*, 586(1), 11-23.
- Ergin, E., & Kartal, A. (2020). Menstrual cycle and sporting performance perceptions of elite volleyball players. *International Journal of Applied Exercise Physiology*, 9(10), 57-64.
- Esbjornsson-Liljedahl, M., Sundberg, C. J., Norman, B., & Jansson, E. (1999). Metabolic response in type I and type II muscle fibers during a 30-s cycle sprint in men and women. *Journal of Applied Physiology*, 87(4), 1326-1332.
- Esbjornsson-Liljedahl, M., Bodin, K., & Jansson, E. (2002). Smaller muscle ATP reduction in women than in men by repeated bouts of sprint exercise. *Journal of Applied Physiology*, 93(3), 1075-1083.

- Eston, R. G., & Burke, E. J. (1984). Effects of the menstrual cycle on selected responses to short constant-load exercise. *Journal of Sports Sciences*, 2(2), 145-153.
- Ezenwaka, E. C., Akanji, A. O., Adejuwon, C. A., Abbiyesuku, F. M., & Akinlade, K. S. (1993). Insulin responses following glucose administration in menstruating women. *International Journal of Gynecology & Obstetrics*, 42(2), 155-159.
- Faude, O., Koch, T., & Meyer, T. (2012). Straight sprinting is the most frequent action in goal situations in professional football. *Journal of sports sciences*, 30(7), 625-631.
- Fazil, K. N., Fatyh, K., Guleda, B., Murat, T., Yakup, P., & Fulya, E. (2010). Some performance parameter changes during menstrual cycle periods of athletes and non-athletes. *Ovidius University Annals, Series Physical Education & Sport/Science, Movement & Health*, 10(1).
- Feng, Z., Cheng, Y., & Zhang, J. T. (2004). Long-term effects of melatonin or 17 β -estradiol on improving spatial memory performance in cognitively impaired, ovariectomized adult rats. *Journal of pineal research*, 37(3), 198-206.
- Fernández, G., Weis, S., Stoffel-Wagner, B., Tendolkar, I., Reuber, M., Beyenburg, S., ... & Elger, C. E. (2003). Menstrual cycle-dependent neural plasticity in the adult human brain is hormone, task, and region specific. *Journal of Neuroscience*, 23(9), 3790-3795.
- Ferrell, R. J., O'Connor, K. A., Rodríguez, G., Gorrindo, T., Holman, D. J., Brindle, E., ... & Weinstein, M. (2005). Monitoring reproductive aging in a 5-year prospective study: aggregate and individual changes in steroid hormones and menstrual cycle lengths with age. *Menopause*, 12(5), 567-577.
- Findlay, R. J., Macrae, E. H., Whyte, I. Y., Easton, C., & Forrest, L. J. (2020). How the menstrual cycle and menstruation affect sporting performance: experiences and perceptions of elite female rugby players. *British journal of sports medicine*, 54(18), 1108-1113.
- Foster, R., Vaisberg, M., Bachi, A. L. L., Dos Santos, J. D. M. B., de Paula Vieira, R., Luna-Junior, L. A., ... & Di-Bella, Z. I. (2019). Premenstrual syndrome, inflammatory status, and mood states in soccer players. *Neuroimmunomodulation*, 26(1), 1-6.
- Frankovich, R. J., & Lebrun, C. M. (2000). Menstrual cycle, contraception, and performance. *Clinics in sports medicine*, 19(2), 251-271.
- Frontera, W. R., & Ochala, J. (2015). Skeletal muscle: a brief review of structure and function. *Calcified tissue international*, 96, 183-195.
- Friden, J., Sjöström, M., & Ekblom, B. (1981). A morphological study of delayed muscle soreness. *Experientia*, 37, 506-507.
- Frontera, W. R., Hughes, V. A., Lutz, K. J., & Evans, W. J. (1991). A cross-sectional study of muscle strength and mass in 45-to 78-yr-old men and women. *Journal of applied physiology*, 71(2), 644-650.
- Fruzzetti, F., Lello, S., Lazzarini, V., Fratta, S., Orru, M., Sorge, R., ... & Paoletti, A. M. (2007). The oral contraceptive containing 30 μ g of ethinylestradiol plus 3 mg of drospirenone is able to antagonize the increase of extracellular water occurring in healthy young women during the luteal phase of the menstrual cycle: an observational study. *Contraception*, 75(3), 199-203.
- Gabbett, T. J., & Mulvey, M. J. (2008). Time-motion analysis of small-sided training games and competition in elite women soccer players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 22(2), 543-552.
- Gabbett, T. J., Wiig, H., & Spencer, M. (2013). Repeated high-intensity running and sprinting in elite women's soccer competition. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 8(2), 130-138.

- Gandevia, S. C. (2001). Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiological reviews*.
- García-Pinillos, F., Bujalance-Moreno, P., Lago-Fuentes, C., Ruiz-Alias, S. A., Domínguez-Azpíroz, I., Mecías-Calvo, M., & Ramirez-Campillo, R. (2021). Effects of the menstrual cycle on jumping, sprinting and force-velocity profiling in resistance-trained women: a preliminary study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(9), 4830.
- Garcia-Unanue, J., Fernandez-Luna, A., Burillo, P., Gallardo, L., Sanchez-Sanchez, J., Manzano-Carrasco, S., & Felipe, J. L. (2020). Key performance indicators at FIFA Women's World Cup in different playing surfaces. *Plos one*, *15*(10), e0241385.
- Garvican, L. A., Hammond, K., Varley, M. C., Gore, C. J., Billaut, F., & Aughey, R. J. (2014). Lower running performance and exacerbated fatigue in soccer played at 1600 m. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *9*(3), 397-404.
- Ghazel, N., Souissi, A., Chtourou, H., Aloui, G., & Souissi, N. (2022). The effect of music on short-term exercise performance during the different menstrual cycle phases in female handball players. *Research in Sports Medicine*, *30*(1), 50-60.
- Giacomonil, M., Bernard, T., Gavarry, O., Altare, S., & Falgairette, G. (2000). Influence of the menstrual cycle phase and menstrual symptoms on maximal anaerobic performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *32*(2), 486.
- Gimunová, M., Paulínyová, A., Bernaciková, M., & Paludo, A. C. (2022). The prevalence of menstrual cycle disorders in female athletes from different sports disciplines: A rapid review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(21), 14243.
- Girard, O., Mendez-Villanueva, A., & Bishop, D. (2011). Repeated-sprint ability—part I: factors contributing to fatigue. *Sports medicine*, *41*, 673-694.
- Glaise, P., Morel, B., Rogowski, I., Cornu, B., & Martin, C. (2022). Influence of repeated-sprint ability on the in-game activity profiles of semiprofessional rugby union players according to position. *Frontiers in Sports and Active Living*, *4*, 857373.
- Goldberg, A. L., & Pette, D. (1980). Plasticity of Muscle.
- Goldsmith, E., & Glaister, M. (2020). The effect of the menstrual cycle on running economy. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, *60*(4), 610-617.
- Gonçalves, L., Clemente, F. M., Barrera, J. I., Sarmiento, H., González-Fernández, F. T., Palucci Vieira, L. H., ... & Carral, J. C. (2021). Relationships between fitness status and match running performance in adult women soccer players: A cohort study. *Medicina*, *57*(6), 617.
- Gordon, D., Hughes, F., Young, K., Scruton, A., Keiller, D., Caddy, O., ... & Barnes, R. (2013). The effects of menstrual cycle phase on the development of peak torque under isokinetic conditions. *Isokinetics and Exercise Science*, *21*(4), 285-291.
- Gore, C. J., McSharry, P. E., Hewitt, A. J., & Saunders, P. U. (2008). Preparation for football competition at moderate to high altitude. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, *18*, 85-95.
- Graja, A., Kacem, M., Hammouda, O., Borji, R., Bouzid, M. A., Souissi, N., & Rebai, H. (2022). Physical, biochemical, and neuromuscular responses to repeated sprint exercise in eumenorrheic female handball players: effect of menstrual cycle phases. *Journal of strength and conditioning research*, *36*(8), 2268-2276.
- Green, H. J., Fraser, I. G., & Ranney, D. A. (1984). Male and female differences in enzyme activities of energy metabolism in vastus lateralis muscle. *Journal of the neurological sciences*, *65*(3), 323-331.

- Greenhall, M., Taipale, R. S., Ihalainen, J. K., & Hackney, A. C. (2020). Influence of the menstrual cycle phase on marathon performance in recreational runners. *International journal of sports physiology and performance*, 16(4), 601-604.
- Greenhall, M. (2021). Influence of the menstrual cycle phase on marathon... *ijspp*, 2020, 0238.
- Greising, S. M., Baltgalvis, K. A., Lowe, D. A., & Warren, G. L. (2009). Hormone therapy and skeletal muscle strength: a meta-analysis. *Journals of Gerontology Series A: Biomedical Sciences and Medical Sciences*, 64(10), 1071-1081.
- Griffin, J., Newans, T., Horan, S., Keogh, J., Andreatta, M., & Minahan, C. (2021). Acceleration and high-speed running profiles of women's international and domestic football matches. *Frontiers in Sports and Active Living*, 3, 604605.
- Guo, H., Dong, X., & Zhang, J. (2005). Hormone levels at different menstrual cycle phases and changes of athletic performance in female athletes. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 188-190.
- Hackney, A. C. (1990). Effects of the menstrual cycle on resting muscle glycogen content. *Hormone and metabolic research*, 22(12), 647-647.
- Hackney, A. C., McCracken-Compton, M. A., & Ainsworth, B. (1994). Substrate responses to submaximal exercise in the midfollicular and midluteal phases of the menstrual cycle. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 4(3), 299-308.
- Hackney, A. C., & Viru, A. (2008). Research methodology: endocrinologic measurements in exercise science and sports medicine. *Journal of athletic training*, 43(6), 631-639.
- Hackney, A. C., Kallman, A. L., & Aġġön, E. (2019). Female sex hormones and the recovery from exercise: Menstrual cycle phase affects responses. *Biomedical human kinetics*, 11(1), 87-89.
- Hackney, A. C., & Constantini, N. W. (Eds.). (2020). *Endocrinology of physical activity and sport*. Springer International Publishing AG.
- Hackney, A. C. (2021). Menstrual cycle hormonal changes and energy substrate metabolism in exercising women: a perspective. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(19), 10024.
- Halbreich, U., Rojansky, N., Palter, S., Tworek, H., Hissin, P., & Wang, K. (1995). Estrogen augments serotonergic activity in postmenopausal women. *Biological psychiatry*, 37(7), 434-441.
- Ham, S., Kim, S., Choi, H., Lee, Y., & Lee, H. (2020). Greater muscle stiffness during contraction at menstruation as measured by shear-wave elastography. *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*, 250(4), 207-213.
- Hamadeh, M. J., Devries, M. C., & Tarnopolsky, M. A. (2005). Estrogen supplementation reduces whole body leucine and carbohydrate oxidation and increases lipid oxidation in men during endurance exercise. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 90(6), 3592-3599.
- Hampson, E. (1990). Estrogen-related variations in human spatial and articulatory-motor skills. *Psychoneuroendocrinology*, 15(2), 97-111.
- Hansen, F. M., Fahmy, N., & Nielsen, J. H. (1980). The influence of sexual hormones on lipogenesis and lipolysis in rat fat cells. *European Journal of Endocrinology*, 95(4), 566-570.
- Hansen, M., Miller, B. F., Holm, L., Doessing, S., Petersen, S. G., Skovgaard, D., ... & Langberg, H. (2009). Effect of administration of oral contraceptives in vivo on collagen synthesis in tendon and muscle connective tissue in young women. *Journal of applied physiology*, 106(4), 1435-1443.

- Hansen, M., Coupe, C., Hansen, C. S., Skovgaard, D., Kovanen, V., Larsen, J. O., ... & Kjaer, M. (2013). Impact of oral contraceptive use and menstrual phases on patellar tendon morphology, biochemical composition, and biomechanical properties in female athletes. *Journal of Applied Physiology*, *114*(8), 998-1008.
- Hansen, P. A., McCarthy, T. J., Pasia, E. N., Spina, R. J., & Gulve, E. A. (1996). Effects of ovariectomy and exercise training on muscle GLUT-4 content and glucose metabolism in rats. *Journal of Applied Physiology*, *80*(5), 1605-1611.
- Hansen, M., Miller, B. F., Holm, L., Doessing, S., Petersen, S. G., Skovgaard, D., ... & Langberg, H. (2009). Effect of administration of oral contraceptives in vivo on collagen synthesis in tendon and muscle connective tissue in young women. *Journal of applied physiology*, *106*(4), 1435-1443.
- Harkness-Armstrong, A., Till, K., Datson, N., & Emmonds, S. (2020). Technical characteristics of elite youth female soccer match-play: position and age group comparisons between under 14 and under 16 age groups. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, *20*(6), 942-959.
- Harkness-Armstrong, A., Till, K., Datson, N., & Emmonds, S. (2021). Whole and peak physical characteristics of elite youth female soccer match-play. *Journal of Sports sciences*, *39*(12), 1320-1329.
- Harkness-Armstrong, A., Till, K., Datson, N., Myhill, N., & Emmonds, S. (2022). A systematic review of match-play characteristics in women's soccer. *Plos one*, *17*(6), e0268334.
- Harlow, S. D., Gass, M., Hall, J. E., Lobo, R., Maki, P., Rebar, R. W., ... & STRAW+ 10 Collaborative Group. (2012). Consensus statement: executive summary of the stages of reproductive aging workshop+ 10: addressing the unfinished agenda of staging reproductive aging. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, *97*(4), 1159.
- Hatta, H., Atomi, Y., Shinohara, S., Yamamoto, Y., & Yamada, S. (1988). The effects of ovarian hormones on glucose and fatty acid oxidation during exercise in female ovariectomized rats. *Hormone and metabolic research*, *20*(10), 609-611.
- Haugen, T. A., Tønnessen, E., & Seiler, S. (2012). Speed and countermovement-jump characteristics of elite female soccer players, 1995–2010. *International journal of sports physiology and performance*, *7*(4), 340-349.
- Heiling, V. J., & Jensen, M. D. (1992). Free fatty acid metabolism in the follicular and luteal phases of the menstrual cycle. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, *74*(4), 806-810
- Hertel, J., Williams, N. I., Olmsted-Kramer, L. C., Leidy, H. J., & Putukian, M. (2006). Neuromuscular performance and knee laxity do not change across the menstrual cycle in female athletes. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, *14*, 817-822.
- Hewett, T. E. (2000). Neuromuscular and hormonal factors associated with knee injuries in female athletes: strategies for intervention. *Sports medicine*, *29*, 313-327.
- Hewitt, A., Norton, K., & Lyons, K. (2014). Movement profiles of elite women soccer players during international matches and the effect of opposition's team ranking. *Journal of sports sciences*, *32*(20), 1874-1880.
- Hoff, J., Wisløff, U., Engen, L. C., Kemi, O. J., & Helgerud, J. (2002). Soccer specific aerobic endurance training. *British journal of sports medicine*, *36*(3), 218-221.
- Hohmann, E., Bryant, A. L., Livingstone, E., Reaburn, P., Tetsworth, K., & Imhoff, A. (2015). Tibial acceleration profiles during the menstrual cycle in female athletes. *Archives of orthopaedic and trauma surgery*, *135*, 1419-1427.

- Hoppeler, H., Lüthi, P., Claassen, H., Weibel, E. R., & Howald, H. (1973). The ultrastructure of the normal human skeletal muscle: a morphometric analysis on untrained men, women and well-trained orienteers. *Pflügers Archiv*, 344, 217-232.
- Horton, T. J., Miller, E. K., Glueck, D., & Tench, K. (2002). No effect of menstrual cycle phase on glucose kinetics and fuel oxidation during moderate-intensity exercise. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 282(4), E752-E762.
- Horton, T. J., Miller, E. K., & Bourret, K. (2006). No effect of menstrual cycle phase on glycerol or palmitate kinetics during 90 min of moderate exercise. *Journal of Applied Physiology*, 100(3), 917-925.
- Horvath, S. M., & Drinkwater, B. L. (1982). Thermoregulation and the menstrual cycle. *Aviation, space, and environmental medicine*, 53(8), 790-794.
- Howard, A. D., Feighner, S. D., Cully, D. F., Arena, J. P., Liberators, P. A., Rosenblum, C. I., ... & Van der Ploeg, L. H. (1996). A receptor in pituitary and hypothalamus that functions in growth hormone release. *Science*, 273(5277), 974-977.
- Huxley, H. E. (1957). The double array of filaments in cross-striated muscle. *The Journal of Cell Biology*, 3(5), 631-648.
- Irie, T., Takahata, M., Majima, T., Abe, Y., Komatsu, M., Iwasaki, N., & Minami, A. (2010). Effect of selective estrogen receptor modulator/raloxifene analogue on proliferation and collagen metabolism of tendon fibroblast. *Connective tissue research*, 51(3), 179-187.
- Isacco, L., Duché, P., & Boisseau, N. (2012). Influence of hormonal status on substrate utilization at rest and during exercise in the female population. *Sports Medicine*, 42, 327-342.
- Jacobs, I., Tesch, P. A., Bar-Or, O., Karlsson, J., & Dotan, R. (1983). Lactate in human skeletal muscle after 10 and 30 s of supramaximal exercise. *Journal of Applied Physiology*, 55(2), 365-367.
- Jagim, A. R., Murphy, J., Schaefer, A. Q., Askow, A. T., Luedke, J. A., Erickson, J. L., & Jones, M. T. (2020). Match demands of women's collegiate soccer. *Sports*, 8(6), 87.
- Jarvis, S. S., VanGundy, T. B., Galbreath, M. M., Shibata, S., Okazaki, K., Reelick, M. F., ... & Fu, Q. (2011). Sex differences in the modulation of vasomotor sympathetic outflow during static handgrip exercise in healthy young humans. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 301(1), R193-R200.
- Jeong, J. K., Tremere, L. A., Burrows, K., Majewska, A. K., & Pinaud, R. (2011). The mouse primary visual cortex is a site of production and sensitivity to estrogens. *PLoS One*, 6(5), e20400.
- Jørgensen, S. B., Richter, E. A., & Wojtaszewski, J. F. (2006). Role of AMPK in skeletal muscle metabolic regulation and adaptation in relation to exercise. *The Journal of physiology*, 574(1), 17-31.
- Julian, R., Hecksteden, A., Fullagar, H. H., & Meyer, T. (2017). The effects of menstrual cycle phase on physical performance in female soccer players. *PLoS one*, 12(3), e0173951.
- Julian, R., Skorski, S., Hecksteden, A., Pfeifer, C., Bradley, P. S., Schulze, E., & Meyer, T. (2021). Menstrual cycle phase and elite female soccer match-play: influence on various physical performance outputs. *Science and Medicine in Football*, 5(2), 97-104.
- Kahlert, S., Grohé, C., Karas, R. H., Löbber, K., Neyses, L., & Vetter, H. (1997). Effects of estrogen on skeletal myoblast growth. *Biochemical and biophysical research communications*, 232(2), 373-378.

- Kalkhoff, R. K. (1982). Metabolic effects of progesterone. *American journal of obstetrics and gynecology*, 142(6), 735-738.
- Kaltsas, G. A., Powles, T. B., Evanson, J., Plowman, P. N., Drinkwater, J. E., Jenkins, P. J., ... & Grossman, A. B. (2000). Hypothalamo-pituitary abnormalities in adult patients with langerhans cell histiocytosis: clinical, endocrinological, and radiological features and response to treatment. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 85(4), 1370-1376.
- Kapidžić, A., Pojskić, H., Muratović, M., Užičanin, E., & Bilalić, J. (2011). Correlation of tests for evaluating explosive strength and agility of football players. *Sport Scientific & Practical Aspects*, 8(2).
- Keizer, H. A., & Rogol, A. D. (1990). Physical exercise and menstrual cycle alterations: what are the mechanisms?. *Sports Medicine*, 10, 218-235.
- Kendrick, Z. V., Steffen, C. A., Rumsey, W. L., & Goldberg, D. I. (1987). Effect of estradiol on tissue glycogen metabolism in exercised oophorectomized rats. *Journal of Applied Physiology*, 63(2), 492-496.
- Kerksick, C., Taylor, L., Harvey, A., & Willoughby, D. (2008). Gender-related differences in muscle injury, oxidative stress, and apoptosis. *Medicine+ Science in Sports+ Exercise*, 40(10), 1772.
- Howailed, I. A., Petrofsky, J., Lohman, E., Daher, N., & Mohamed, O. (2015). 17 β -estradiol induced effects on anterior cruciate ligament laxness and neuromuscular activation patterns in female runners. *Journal of Women's Health*, 24(8), 670-680.
- Kikuchi, H., Nakatani, Y., Seki, Y., Yu, X., Sekiyama, T., Sato-Suzuki, I., & Arita, H. (2010). Decreased blood serotonin in the premenstrual phase enhances negative mood in healthy women. *Journal of Psychosomatic Obstetrics & Gynecology*, 31(2), 83-89.
- Kirkendall, D. T. (2007). Issues in training the female player. *British journal of sports medicine*, 41(suppl 1), i64-i67.
- Kirkendall, D. T., & Krstrup, P. (2022). Studying professional and recreational female footballers: A bibliometric exercise. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 32, 12-26.
- Kishali, N. F., Imamoglu, O., Atan, T., Akyol, P., Burmaoglu, G., Bas, M., & Yildirim, K. (2004). Some performance parameter changes during menstrual cycle periods of athletes and non-athletes. *Ann. Rheum. Dis*, 63, 490.
- Kitajima, Y., & Ono, Y. (2016). Estrogens maintain skeletal muscle and satellite cell functions. *J Endocrinol*, 229(3), 267-275.
- Knicker, A. J., Renshaw, I., Oldham, A. R., & Cairns, S. P. (2011). Interactive processes link the multiple symptoms of fatigue in sport competition. *Sports medicine*, 41, 307-328.
- Klein, S. A. M. U. E. L., & Wolfe, R. R. (1992). Carbohydrate restriction regulates the adaptive response to fasting. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 262(5), E631-E636.
- Kluger, B. M., Krupp, L. B., & Enoka, R. M. (2013). Fatigue and fatigability in neurologic illnesses: proposal for a unified taxonomy. *Neurology*, 80(4), 409-416.
- KOBORI, M., & YAMAMURO, T. (1989). Effects of gonadectomy and estrogen administration on rat skeletal muscle. *Clinical Orthopaedics and Related Research (1976-2007)*, 243, 306-311.
- Konstadinidou, X., & Tsigilis, N. (2005). Offensive playing profiles of football teams from the 1999 Women's World Cup Finals. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 5(1), 61-71.
- Kriengsinyos, W., Wykes, L. J., Goonewardene, L. A., Ball, R. O., & Pencharz, P. B. (2004). Phase of menstrual cycle affects lysine requirement in healthy women. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 287(3), E489-E496.

- Krustrup, P., Mohr, M., Ellingsgaard, H., & Bangsbo, J. (2005). Physical demands during an elite female soccer game: importance of training status. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 37(7), 1242-1248.
- Krustrup, P., Andersson, H., Mohr, M., & Randers, M. B. (2008). Match activities and fatigue development of elite female soccer players at different levels of competition. In *Science and football VI* (pp. 231-237). Routledge.
- Krustrup, P., Zebis, M., Jensen, J. M., & Mohr, M. (2010). Game-induced fatigue patterns in elite female soccer. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(2), 437-441.
- Krustrup, P., Mohr, M., Nybo, L., Draganidis, D., Randers, M. B., Ermidis, G., ... & Fatouros, I. G. (2022). Muscle metabolism and impaired sprint performance in an elite women's football game. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 32, 27-38.
- Kubayi, A., & Larkin, P. (2020). Technical performance of soccer teams according to match outcome at the 2019 FIFA Women's World Cup. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 20(5), 908-916.
- Kumar, S., Mufti, M., & Kisan, R. (2013). Variation of reaction time in different phases of menstrual cycle. *Journal of Clinical and Diagnostic Research: JCDR*, 7(8), 1604.
- Lago-Peñas, C., & Lago-Ballesteros, J. (2011). Game location and team quality effects on performance profiles in professional soccer. *Journal of sports science & medicine*, 10(3), 465.
- Lamont, L. S. (1987). Sweat lactate secretion during exercise in relation to women's aerobic capacity. *Journal of Applied Physiology*, 62(1), 194-198.
- Lara, B., Gutiérrez Hellín, J., Ruiz Moreno, C., Romero Moraleda, B., & Del Coso, J. (2019). Acute caffeine intake increases performance in the 15-s Wingate test during the menstrual cycle.
- Lariviere, F., Moussalli, R., & Garrel, D. R. (1994). Increased leucine flux and leucine oxidation during the luteal phase of the menstrual cycle in women. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 267(3), E422-E428.
- Larsen, B., Morris, K., Quinn, K., Osborne, M., & Minahan, C. (2020). Practice does not make perfect: A brief view of athletes' knowledge on the menstrual cycle and oral contraceptives. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 23(8), 690-694.
- Latour, M. G., Shinoda, M., & Lavoie, J. M. (2001). Metabolic effects of physical training in ovariectomized and hyperestrogenic rats. *Journal of applied physiology*, 90(1), 235-241.
- Lebrun, C. M. (1993). Effect of the different phases of the menstrual cycle and oral contraceptives on athletic performance. *Sports medicine*, 16, 400-430.
- Lebrun, C. M., McKenzie, D. C., Prior, J. C., & Taunton, J. E. (1995). Effects of menstrual cycle phase on athletic performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 27(3), 437-444.
- Lee, P. Y., Bazar, K. A., & Yun, A. J. (2004). Menstrual variation of autonomic balance may be a factor in exacerbations of certain diseases during the menstrual cycle. *Medical hypotheses*, 63(1), 163-167.
- Lee, C. Y., Liu, X., Smith, C. L., Zhang, X., Hsu, H. C., Wang, D. Y., & Luo, Z. P. (2004). The combined regulation of estrogen and cyclic tension on fibroblast biosynthesis derived from anterior cruciate ligament. *Matrix biology*, 23(5), 323-329.
- Letzelter, H., & Letzelter, M. (1990). Entraînement de la force: théorie, méthodes, pratiques. (*No Title*).
- Leung, K. C., Johannsson, G., Leong, G. M., & Ho, K. K. (2004). Estrogen regulation of growth hormone action. *Endocrine reviews*, 25(5), 693-721.

- Lin, C. Y., Casey, E., Herman, D. C., Katz, N., & Tenforde, A. S. (2018). Sex differences in common sports injuries. *PM&R*, *10*(10), 1073-1082.
- Lippi M. (2007). Interview of Marcelo Lippi. The Technician – UEFA newsletters for coaches, N°35, Janvier 2007.
- Loucks, A. B., Mortola, J. F., Girton, L., & Yen, S. S. C. (1989). Alterations in the hypothalamic-pituitary-ovarian and the hypothalamic-pituitary-adrenal axes in athletic women. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, *68*(2), 402-411.
- Lowe, D. A., Surek, J. T., Thomas, D. D., & Thompson, L. V. (2001). Electron paramagnetic resonance reveals age-related myosin structural changes in rat skeletal muscle fibers. *American Journal of Physiology-Cell Physiology*, *280*(3), C540-C547.
- Lowe, D. A., Baltgalvis, K. A., & Greising, S. M. (2010). Mechanisms behind estrogens' beneficial effect on muscle strength in females. *Exercise and sport sciences reviews*, *38*(2), 61.
- Lundsgaard, A. M., & Kiens, B. (2014). Gender differences in skeletal muscle substrate metabolism—molecular mechanisms and insulin sensitivity. *Frontiers in endocrinology*, *5*, 195.
- Luo, T., & Kim, J. K. (2016). The role of estrogen and estrogen receptors on cardiomyocytes: an overview. *Canadian Journal of Cardiology*, *32*(8), 1017-1025.
- MacDougall, J., Wenger, H., & Green, H. (1991). Physiological testing of the high performance athlete (Sec. ed). *Human Kinetic Books. Champaign (Illinois).*—1991.—432 p.
- MacNutt, M. J., De Souza, M. J., Tomczak, S. E., Homer, J. L., & Sheel, A. W. (2012). Resting and exercise ventilatory chemosensitivity across the menstrual cycle. *Journal of Applied Physiology*, *112*(5), 737-747.
- Maciejczyk, M., Więcek, M., Szymura, J., Szygula, Z., Wiecha, S., & Cempla, J. (2014). The influence of increased body fat or lean body mass on aerobic performance. *PLoS one*, *9*(4), e95797.
- Maciejczyk, M., Wiecek, M., Szymura, J., Szygula, Z., & Brown, L. E. (2015). Influence of increased body mass and body composition on cycling anaerobic power. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *29*(1), 58-65.
- Magkos, F., Wright, D. C., Patterson, B. W., Mohammed, B. S., & Mittendorfer, B. (2006). Lipid metabolism response to a single, prolonged bout of endurance exercise in healthy young men. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, *290*(2), E355-E362.
- Magnusson, S. P., Hansen, M., Langberg, H., Miller, B., Haraldsson, B., Kjoeller Westh, E., ... & Kjær, M. (2007). The adaptability of tendon to loading differs in men and women. *International journal of experimental pathology*, *88*(4), 237-240.
- Maher, A. C., Akhtar, M., Vockley, J., & Tarnopolsky, M. A. (2010). Women have higher protein content of β -oxidation enzymes in skeletal muscle than men. *PLoS One*, *5*(8), e12025.
- Mara, J. K., Thompson, K. G., Pumpa, K. L., & Morgan, S. (2017a). The acceleration and deceleration profiles of elite female soccer players during competitive matches. *Journal of science and medicine in sport*, *20*(9), 867-872.
- Mara, J. K., Thompson, K. G., Pumpa, K. L., & Morgan, S. (2017b). Quantifying the high-speed running and sprinting profiles of elite female soccer players during competitive matches using an optical player tracking system. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *31*(6), 1500-1508.
- Marcora, S. M., Staiano, W., & Manning, V. (2009). Mental fatigue impairs physical performance in humans. *Journal of applied physiology*.

- Maréchal, G., & Mommaerts, W. F. H. M. (1963). The metabolism of phosphocreatine during an isometric tetanus in the frog sartorius muscle. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Specialized Section on Lipids and Related Subjects*, 70, 53-67.
- Marshall, J. (1963). Thermal changes in the normal menstrual cycle. *British medical journal*, 1(5323), 102.
- Martin, D., Sale, C., Cooper, S. B., & Elliott-Sale, K. J. (2018). Period prevalence and perceived side effects of hormonal contraceptive use and the menstrual cycle in elite athletes. *International journal of sports physiology and performance*, 13(7), 926-932.
- Martin, D., Timmins, K., Cowie, C., Alty, J., Mehta, R., Tang, A., & Varley, I. (2021). Injury incidence across the menstrual cycle in international footballers. *Frontiers in sports and active living*, 17.
- Martínez-Fortuny, N., Alonso-Calvete, A., Da Cuña-Carrera, I., & Abalo-Núñez, R. (2023). Menstrual cycle and sport injuries: a systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(4), 3264.
- Martínez-Lagunas, V., Niessen, M., & Hartmann, U. (2014). Women's football: Player characteristics and demands of the game. *Journal of Sport and Health Science*, 3(4), 258-272.
- Mas, A., Elam, L., Diamond, M. P., Simon, C., & Al-Hendy, A. (2015). Synergistic effect of estrogen and progesterone on myometrial stem cell expansion in vivo. *Fertility and Sterility*, 104(3), e72.
- McClung, J. M., Davis, J. M., Wilson, M. A., Goldsmith, E. C., & Carson, J. A. (2006). Estrogen status and skeletal muscle recovery from disuse atrophy. *Journal of Applied Physiology*, 100(6), 2012-2023.
- McCormack, W. P., Stout, J. R., Wells, A. J., Gonzalez, A. M., Mangine, G. T., Fragala, M. S., & Hoffman, J. R. (2014). Predictors of high-intensity running capacity in collegiate women during a soccer game. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 28(4), 964-970.
- McFadden, B. A., Walker, A. J., Arent, M. A., Bozzini, B. N., Sanders, D. J., Cintineo, H. P., ... & Arent, S. M. (2020). Biomarkers correlate with body composition and performance changes throughout the season in women's Division I collegiate soccer players. *Frontiers in Sports and Active Living*, 2, 74.
- McHaffie, S. J., Langan-Evans, C., Morehen, J. C., Strauss, J. A., Areta, J. L., Rosimus, C., ... & Morton, J. P. (2022). Normalising the conversation: a qualitative analysis of player and stakeholder perceptions of menstrual health support within elite female soccer. *Science and Medicine in Football*, 6(5), 633-642.
- McKee, J. E., & Cameron, N. (1997). Bioelectrical impedance changes during the menstrual cycle. *American Journal of Human Biology: The Official Journal of the Human Biology Association*, 9(2), 155-161.
- McLay, R. T., Thomson, C. D., Williams, S. M., & Rehrer, N. J. (2007). Carbohydrate loading and female endurance athletes: effect of menstrual-cycle phase. *International journal of sport nutrition and exercise metabolism*, 17(2), 189-205.
- McNulty, K. L., Elliott-Sale, K. J., Dolan, E., Swinton, P. A., Ansdell, P., Goodall, S., ... & Hicks, K. M. (2020). The effects of menstrual cycle phase on exercise performance in eumenorrheic women: a systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 50, 1813-1827.
- Mendez-Villanueva, A., Edge, J., Suriano, R., Hamer, P., & Bishop, D. (2012). The recovery of repeated-sprint exercise is associated with PCr resynthesis, while muscle pH and EMG amplitude remain depressed. *PLoS one*, 7(12), e51977.
- Miller, A. E. J., MacDougall, J. D., Tarnopolsky, M. A., & Sale, D. G. (1993). Gender differences in strength and muscle fiber characteristics. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 66, 254-262.

- Miller, P. B., & Soules, M. R. (1996). The usefulness of a urinary LH kit for ovulation prediction during menstrual cycles of normal women. *Obstetrics & Gynecology*, *87*(1), 13-17.
- Miller, B. F., Hansen, M., Olesen, J. L., Flyvbjerg, A., Schwarz, P., Babraj, J. A., ... & Kjaer, M. (2006). No effect of menstrual cycle on myofibrillar and connective tissue protein synthesis in contracting skeletal muscle. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, *290*(1), E163-E168.
- Miller, B. F., Hansen, M., Olesen, J. L., Schwarz, P., Babraj, J. A., Smith, K., ... & Kjaer, M. (2007). Tendon collagen synthesis at rest and after exercise in women. *Journal of Applied Physiology*, *102*(2), 541-546.
- Miscec, C. M., Potteiger, J. A., Nau, K. L., & Zebas, C. J. (1997). Do varying environmental and menstrual cycle conditions affect anaerobic power output in female athletes?. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *11*(4), 219-223.
- Mittendorfer, B., Horowitz, J. F., & Klein, S. (2002). Effect of gender on lipid kinetics during endurance exercise of moderate intensity in untrained subjects. *American Journal of Physiology-Endocrinology And Metabolism*, *283*(1), E58-E65.
- Mkumbuzi, N. S., Dlamini, S. B., Chibhabha, F., Govere, F. M., & Manda-Taylor, L. (2022). The menstrual cycle and football: The experiences of African women football players. *Science and Medicine in Football*, *6*(5), 626-632.
- Mohr, M., Krstrup, P., & Bangsbo, J. (2003). Match performance of high-standard soccer players with special reference to development of fatigue. *Journal of sports sciences*, *21*(7), 519-528.
- Mohr, M., Krstrup, P., Nybo, L., Nielsen, J. J., & Bangsbo, J. (2004). Muscle temperature and sprint performance during soccer matches—beneficial effect of re-warm-up at half-time. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, *14*(3), 156-162.
- Mohr, M., Krstrup, P., & Bangsbo, J. (2005). Fatigue in soccer: a brief review. *Journal of sports sciences*, *23*(6), 593-599.
- Mohr, M., Krstrup, P., Andersson, H., Kirkendal, D., & Bangsbo, J. (2008). Match activities of elite women soccer players at different performance levels. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *22*(2), 341-349.
- Mohr, M., Mujika, I., Santisteban, J., Randers, M. B., Bischoff, R., Solano, R., ... & Krstrup, P. (2010). Examination of fatigue development in elite soccer in a hot environment: a multi-experimental approach. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, *20*, 125-132.
- Mohr, M., Vigh-Larsen, J. F., & Krstrup, P. (2022). Muscle Glycogen in Elite Soccer—A Perspective on the Implication for Performance, Fatigue, and Recovery. *Frontiers in Sports and Active Living*, *4*, 151.
- Montgomery, M. M., & Shultz, S. J. (2010). Isometric knee-extension and knee-flexion torque production during early follicular and postovulatory phases in recreationally active women. *Journal of athletic training*, *45*(6), 586-593.
- Moran, L. J., Noakes, M., Clifton, P. M., & Norman, R. J. (2007). The use of anti-mullerian hormone in predicting menstrual response after weight loss in overweight women with polycystic ovary syndrome. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, *92*(10), 3796-3802.
- Moriceau, J., Fevre, A., Domínguez-Balmaseda, D., González-de-la-Flor, Á., Simón-Areces, J., & García-Pérez-de-Sevilla, G. (2022). The Influence of the Menstrual Cycle and Oral Contraceptives on Knee Laxity or Anterior Cruciate Ligament Injury Risk: A Systematic Review. *Applied Sciences*, *12*(24), 12627.
- Mujika, I., Santisteban, J., Impellizzeri, F. M., & Castagna, C. (2009). Fitness determinants of success in men's and women's football. *Journal of sports sciences*, *27*(2), 107-114.

- Nakayama, T., Suzuki, M., & Ishizuka, N. (1975). Action of progesterone on preoptic thermosensitive neurones. *Nature*, 258(5530), 80-80.
- Nakamura, F. Y., Pereira, L. A., Loturco, I., Rosseti, M., Moura, F. A., & Bradley, P. S. (2017). Repeated-sprint sequences during female soccer matches using fixed and individual speed thresholds. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 31(7), 1802-1810.
- Nassis, G. P. (2013). Effect of altitude on football performance: analysis of the 2010 FIFA World Cup Data. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(3), 703-707.
- Nelson, L. R., & Bulun, S. E. (2001). Estrogen production and action. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 45(3), S116-S124.
- Newton, R. U., & Kraemer, W. J. (1994). Developing explosive muscular power: Implications for a mixed methods training strategy. *Strength & Conditioning Journal*, 16(5), 20-31.
- Nicklas, B. J., Hackney, A. C., & Sharp, R. L. (1989). The menstrual cycle and exercise: performance, muscle glycogen, and substrate responses. *International journal of sports medicine*, 10(04), 264-269.
- Oosthuysen, T., & Bosch, A. N. (2010). The effect of the menstrual cycle on exercise metabolism: implications for exercise performance in eumenorrhoeic women. *Sports medicine*, 40, 207-227.
- Otaka, M., Chen, S. M., Zhu, Y., Tsai, Y. S., Tseng, C. Y., Fogt, D. L., ... & Kuo, C. H. (2018). Does ovulation affect performance in tennis players?. *BMJ open sport & exercise medicine*, 4(1), e000305.
- Özgünen, K. T., Kurdak, S. S., Maughan, R. J., Zeren, C., Korkmaz, S., Ersöz, G., ... & Dvorak, J. (2010). Effect of hot environmental conditions on physical activity patterns and temperature response of football players. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 20, 140-147.
- Pallavi, L. C., SoUza, U. J. D., & Shivaprakash, G. (2017). Assessment of musculoskeletal strength and levels of fatigue during different phases of menstrual cycle in young adults. *Journal of clinical and diagnostic research: JCDR*, 11(2), CC11.
- Panduro, J., Ermidis, G., Røddik, L., Vigh-Larsen, J. F., Madsen, E. E., Larsen, M. N., ... & Randers, M. B. (2022). Physical performance and loading for six playing positions in elite female football: full-game, end-game, and peak periods. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 32, 115-126.
- Parker, L. J., Elliott-Sale, K. J., Hannon, M. P., Morton, J. P., & Close, G. L. (2022). An audit of hormonal contraceptive use in Women's Super League soccer players; implications on symptomology. *Science and Medicine in Football*, 6(2), 153-158.
- Paroo, Z., Dipchand, E. S., & Noble, E. G. (2002). Estrogen attenuates postexercise HSP70 expression in skeletal muscle. *American Journal of Physiology-Cell Physiology*, 282(2), C245-C251.
- Patricio, B. P., & Sergio, B. G. (2019). Normal menstrual cycle. *Menstrual Cycle*, 15.
- Paul, D. J., Bradley, P. S., & Nassis, G. P. (2015). Factors affecting match running performance of elite soccer players: shedding some light on the complexity. *International journal of sports physiology and performance*, 10(4), 516-519.
- Paul, D. J., Gabbett, T. J., & Nassis, G. P. (2016). Agility in team sports: Testing, training and factors affecting performance. *Sports medicine*, 46, 421-442.
- Paulsen, K. M., Butts, C. L., & McDermott, B. P. (2018). Observation of women soccer players' physiology during a single season. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 32(6), 1702-1707.

- Pearson, S. J., Burgess, K. E., & Onambélé, G. L. (2011). Serum relaxin levels affect the in vivo properties of some but not all tendons in normally menstruating young women. *Experimental physiology*, 96(7), 681-688.
- Pereira, H. M., Larson, R. D., & Bembem, D. A. (2020). Menstrual cycle effects on exercise-induced fatigability. *Frontiers in Physiology*, 11, 517.
- Periasamy, M., Herrera, J. L., & Reis, F. C. (2017). Skeletal muscle thermogenesis and its role in whole body energy metabolism. *Diabetes & metabolism journal*, 41(5), 327.
- Persky, A. M., Greene, P. S., Stuble, L., Howell, C. O., Zaulyanov, L., Brazeau, G. A., & Simpkins, J. W. (2000). Protective effect of estrogens against oxidative damage to heart and skeletal muscle in vivo and in vitro (44463). *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine*, 223(1), 59-66.
- Petrofsky, J. S., LeDonne, D. M., Rinehart, J. S., & Lind, A. R. (1976). Isometric strength and endurance during the menstrual cycle. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 35, 1-10.
- Petrofsky, J., Al Maly, A., & Suh, H. J. (2007). Isometric endurance, body and skin temperature and limb and skin blood flow during the menstrual cycle. *Medical science monitor*, 13(3), CR111-CR117.
- Phillips, S. K., Sanderson, A. G., Birch, K., Bruce, S. A., & Woledge, R. C. (1996). Changes in maximal voluntary force of human adductor pollicis muscle during the menstrual cycle. *The Journal of physiology*, 496(2), 551-557.
- Pinel, C. J., Mehta, R., & Okholm Kryger, K. (2022). The impact and experienced barriers menstruation present to football participation in amateur female footballers. *Journal of sports sciences*, 40(17), 1950-1963.
- Pöllänen, E., Ronkainen, P. H., Horttanainen, M., Takala, T., Puolakka, J., Suominen, H., ... & Kovanen, V. (2010). Effects of combined hormone replacement therapy or its effective agents on the IGF-1 pathway in skeletal muscle. *Growth Hormone & IGF Research*, 20(5), 372-379.
- Prilutsky, B. I., Isaka, T., Albrecht, A. M., & Gregor, R. J. (1998). Is coordination of two-joint leg muscles during load lifting consistent with the strategy of minimum fatigue?. *Journal of Biomechanics*, 31(11), 1025-1034.
- Prilutsky, B. I. (2000). Muscle coordination: the discussion continues. *Motor Control*, 4(1), 97-116.
- Principe, V. A., Seixas, I., de Souza Vale, R. G., & Nunes, R. D. A. M. (2021). GPS technology to control of external demands of elite Brazilian female football players during competitions. *Retos: nuevas tendencias en educación física, deporte y recreación*, (40), 18-26.
- Pyne, D. B., Saunders, P. U., Montgomery, P. G., Hewitt, A. J., & Sheehan, K. (2008). Relationships between repeated sprint testing, speed, and endurance. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 22(5), 1633-1637.
- Quadagno, D., Faquin, L., Lim, G. N., Kuminka, W., & Moffatt, R. (1991). The menstrual cycle: does it affect athletic performance?. *The Physician and Sportsmedicine*, 19(3), 121-124.
- Rael, B., Romero-Parra, N., Alfaro-Magallanes, V. M., Barba-Moreno, L., Cupeiro, R., de Jonge, X. J., & Peinado, A. B. (2020). Body composition over the menstrual and oral contraceptive cycle in trained females. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(3), 375-381.
- Ramos, J. E., Al-Nakkash, L., Peterson, A., Gump, B. S., Janjulia, T., Moore, M. S., ... & Carroll, C. C. (2012). The soy isoflavone genistein inhibits the reduction in Achilles tendon collagen content induced by ovariectomy in rats. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 22(5), e108-e114.
- Ramos, G. P., Nakamura, F. Y., Pereira, L. A., Junior, W. B., Mahseredjian, F., Wilke, C. F., ... & Coimbra, C. C. (2017). Movement patterns of a U-20 national women's soccer team during competitive matches: influence of playing position and performance in the first half. *International journal of sports medicine*, 38(10), 747-754.

- Ramos, G. P., Nakamura, F. Y., Penna, E. M., Wilke, C. F., Pereira, L. A., Loturco, I., ... & Coimbra, C. C. (2019). Activity profiles in U17, U20, and senior women's Brazilian national soccer teams during international competitions: are there meaningful differences?. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *33*(12), 3414-3422.
- Rampinini, E., Coutts, A. J., Castagna, C., Sassi, R., & Impellizzeri, F. M. (2007). Variation in top level soccer match performance. *International journal of sports medicine*, 1018-1024.
- Rampinini, E., Alberti, G., Fiorenza, M., Riggio, M., Sassi, R., Borges, T. O., & Coutts, A. J. (2014). Accuracy of GPS devices for measuring high-intensity running in field-based team sports. *International journal of sports medicine*, 49-53.
- Randell, R. K., Carter, J. M., Jeukendrup, A. E., Lizarraga, M. A., Yanguas, J. I., & Rollo, I. A. N. (2019). Fat oxidation rates in professional soccer players. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *51*(8), 1677-1683.
- Randell, R. K., Clifford, T., Drust, B., Moss, S. L., Unnithan, V. B., De Ste Croix, M. B., ... & Rollo, I. (2021). Physiological characteristics of female soccer players and health and performance considerations: a narrative review. *Sports Medicine*, *51*, 1377-1399.
- Rapkin, A., Chang, L. H., & Reading, A. E. (1987). Premenstrual syndrome: a double blind placebo controlled study of treatment with progesterone vaginal suppositories. *Journal of Obstetrics and Gynaecology*, *7*(3), 217-220.
- Read, P., Mehta, R., Rosenbloom, C., Jobson, E., & Okholm Kryger, K. (2022). Elite female football players' perception of the impact of their menstrual cycle stages on their football performance. A semi-structured interview-based study. *Science and Medicine in Football*, *6*(5), 616-625.
- Reis, E., Frick, U., & Schmidtbleicher, D. (1995). Frequency variations of strength training sessions triggered by the phases of the menstrual cycle. *International journal of sports medicine*, *16*(08), 545-550.
- Rice, J. F., & Eggers, D. M. (1989). Basal transsphenoidal encephalocele: MR findings. *AJNR: American Journal of Neuroradiology*, *10*(5 Suppl), S79.
- Rickenlund, A., Carlstrom, K., Ekblom, B., Brismar, T. B., Von Schoultz, B., & Hirschberg, A. L. (2004). Effects of oral contraceptives on body composition and physical performance in female athletes. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, *89*(9), 4364-4370.
- Robergs, R. A., Ghiasvand, F., & Parker, D. (2004). Biochemistry of exercise-induced metabolic acidosis. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*.
- Robinson, M. F., & Watson, P. E. (1965). Day-to-day variations in body-weight of young women. *British Journal of Nutrition*, *19*(1), 225-235.
- Rodrigues, P., de Azevedo Correia, M., & Wharton, L. (2019). Effect of menstrual cycle on muscle strength. *Journal of Exercise Physiology Online*, *22*(5), 89-96.
- Romero-Moraleda, B., Del Coso, J., Gutiérrez-Hellín, J., Ruiz-Moreno, C., Grgic, J., & Lara, B. (2019). The influence of the menstrual cycle on muscle strength and power performance. *Journal of human kinetics*, *68*, 123.
- Romijn, J. A., Coyle, E. F., Sidossis, L. S., Gastaldelli, A., Horowitz, J. F., Endert, E., & Wolfe, R. R. (1993). Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration. *American Journal of Physiology-Endocrinology And Metabolism*, *265*(3), E380-E391.
- Romijn, J. A., Coyle, E. F., Sidossis, L. S., Rosenblatt, J., & Wolfe, R. R. (2000). Substrate metabolism during different exercise intensities in endurance-trained women. *Journal of applied physiology*, *88*(5), 1707-1714.

- Rooney, D. P., Neely, R. D., Cullen, C., Ennis, C. N., Sheridan, B., Atkinson, A. B., ... & Bell, P. M. (1993). The effect of cortisol on glucose/glucose-6-phosphate cycle activity and insulin action. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 77(5), 1180-1183.
- Rosenberg, L., & Park, S. (2002). Verbal and spatial functions across the menstrual cycle in healthy young women. *Psychoneuroendocrinology*, 27(7), 835-841.
- Ruby, B. C., Robergs, R. A., Waters, D. L., Burge, M., Mermier, C., & Stolarczyk, L. (1997). Effects of estradiol on substrate turnover during exercise in amenorrheic females. *Medicine and science in sports and exercise*, 29(9), 1160-1169.
- Sakamoto, K., Sasaki, R., Hong, S., Matsukura, K., & Asai, T. (2014). Comparison of kicking speed between female and male soccer players. *Procedia Engineering*, 72, 50-55.
- Sahlin, K. (1985). NADH in human skeletal muscle during short-term intense exercise. *Pflügers Archiv*, 403, 193-196.
- Saltin, B. (1973). Metabolic fundamentals in exercise. *Medicine and science in sports*, 5(3), 137-146.
- Sarwar, R., Niclos, B. B., & Rutherford, O. M. (1996). Changes in muscle strength, relaxation rate and fatigability during the human menstrual cycle. *The Journal of physiology*, 493(1), 267-272.
- Scambler, A., & Scambler, G. (1985). Menstrual symptoms, attitudes and consulting behaviour. *Social Science & Medicine*, 20(10), 1065-1068.
- Schmitz, R. J., & Shultz, S. J. (2013). Anterior knee stiffness changes in laxity “responders” versus “nonresponders” across the menstrual cycle. *Journal of athletic training*, 48(1), 39-46.
- Schooler, D., Ward, L. M., Merriwether, A., & Caruthers, A. S. (2005). Cycles of shame: Menstrual shame, body shame, and sexual decision-making. *Journal of sex research*, 42(4), 324-334.
- Schumacher, M., Mattern, C., Ghoumari, A., Oudinet, J. P., Liere, P., Labombarda, F., ... & Guennoun, R. (2014). Revisiting the roles of progesterone and allopregnanolone in the nervous system: resurgence of the progesterone receptors. *Progress in neurobiology*, 113, 6-39.
- Scott, D., Norris, D., & Lovell, R. (2020). Dose–response relationship between external load and wellness in elite women’s soccer matches: do customized velocity thresholds add value?. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(9), 1245-1251.
- Sedano, S., Vaeyens, R., Philippaerts, R. M., Redondo, J. C., & Cuadrado, G. (2009). Anthropometric and anaerobic fitness profile of elite and non-elite female soccer players. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 49(4), 387.
- Shagawa, M., Maruyama, S., Sekine, C., Yokota, H., Hirabayashi, R., Hirata, A., ... & Edama, M. (2021). Comparison of anterior knee laxity, stiffness, genu recurvatum, and general joint laxity in the late follicular phase and the ovulatory phase of the menstrual cycle. *BMC musculoskeletal disorders*, 22(1), 1-7.
- Shahraki, S. F., Minoonejad, H., & Tabrizi, Y. M. (2020). Comparison of some intrinsic risk factors of shoulder injury in three phases of menstrual cycle in collegiate female athletes. *Physical Therapy in Sport*, 43, 195-203.
- Shakhlina, L., Roda, O., Kalytka, S., Romaniuk, O., Matskevych, N., & Zakhoshyi, V. (2016). Physical performance during the menstrual cycle of female athletes who specialize in 800 m and 1500 m running. *Journal of Physical Education and Sport*, 16(4), 1345.
- Sheppard, J. M., & Young, W. B. (2006). Agility literature review: Classifications, training and testing. *Journal of sports sciences*, 24(9), 919-932.

- Sim, M., Dawson, B., Landers, G., Swinkels, D. W., Wiegerinck, E., Yeap, B. B., ... & Peeling, P. (2017). Interleukin-6 and hepcidin levels during hormone-deplete and hormone-replete phases of an oral contraceptive cycle: a pilot study. *Annals of Nutrition and Metabolism*, *70*(2), 100-105.
- Simpson, E. R., & Davis, S. R. (2001). Minireview: aromatase and the regulation of estrogen biosynthesis—some new perspectives. *Endocrinology*, *142*(11), 4589-4594.
- Sims, S. T., & Heather, A. K. (2018). Myths and Methodologies: Reducing scientific design ambiguity in studies comparing sexes and/or menstrual cycle phases. *Experimental physiology*, *103*(10), 1309-1317.
- Sipilä, S., Finni, T., & Kovanen, V. (2015). Estrogen influences on neuromuscular function in postmenopausal women. *Calcified tissue international*, *96*, 222-233.
- Smith, J. R., Brown, K. R., Murphy, J. D., & Harms, C. A. (2015). Does menstrual cycle phase affect lung diffusion capacity during exercise?. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, *205*, 99-104.
- Smith, M. J., Keel, J. C., Greenberg, B. D., Adams, L. F., Schmidt, P. J., Rubinow, D. A., & Wassermann, E. M. (1999). Menstrual cycle effects on cortical excitability. *Neurology*, *53*(9), 2069-2069.
- Smith, M. J., Adams, L. F., Schmidt, P. J., Rubinow, D. R., & Wassermann, E. M. (2002). Effects of ovarian hormones on human cortical excitability. *Annals of neurology*, *51*(5), 599-603.
- Smith, S. S., Woodward, D. J., & Chapin, J. K. (1989). Sex steroids modulate motor-correlated increases in cerebellar discharge. *Brain research*, *476*(2), 307-316.
- Sladek, N. E., Chaplin, M. D., & Mannering, G. J. (1974). Sex-Dependent Differences in Drug Metabolism in the Rat: IV. Effect of Morphine Administration. *Drug Metabolism and Disposition*, *2*(3), 293-300.
- Slauterbeck, J. R., Fuzie, S. F., Smith, M. P., Clark, R. J., Xu, K. T., Starch, D. W., & Hardy, D. M. (2002). The menstrual cycle, sex hormones, and anterior cruciate ligament injury. *Journal of athletic*
- Smekal, G., Von Duvillard, S. P., Frigo, P., Tegelhofer, T., Pokan, R., Hofmann, P., ... & Bachl, N. (2007). Menstrual cycle: no effect on exercise cardiorespiratory variables or blood lactate concentration. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *39*(7), 1098-1106.
- Smirnnwong, J., Chutimakul, L., & Sanguanrunsirikul, S. (2015). Core temperature changes and sprint performance of elite female soccer players after a 15-minute warm-up in a hot-humid environment. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *29*(1), 262-269.
- Smirniotou, A., Nikolaou, C., Tsolakis, C., & Athens, E. (2004). The effect of menstrual cycle phases on fencers' neuromuscular performance. *Poster Session*. In.
- Solli, G. S., Sandbakk, S. B., Noordhof, D. A., Ihalainen, J. K., & Sandbakk, Ø. (2020). Changes in self-reported physical fitness, performance, and side effects across the phases of the menstrual cycle among competitive endurance athletes. *International journal of sports physiology and performance*, *15*(9), 1324-1333.
- Soumpasis, I., Grace, B., & Johnson, S. (2020). Real-life insights on menstrual cycles and ovulation using big data. *Human Reproduction Open*, *2020*(2), hoaa011.
- Spangenburg, E. E., Geiger, P. C., Leinwand, L. A., & Lowe, D. A. (2012). Regulation of physiological and metabolic function of muscle by female sex steroids. *Medicine and science in sports and exercise*, *44*(9), 1653.
- Stachenfeld, N. S. (2008). Sex hormone effects on body fluid regulation. *Exercise and sport sciences reviews*, *36*(3), 152.
- Stachoń, A. J. (2016). Menstrual changes in body composition of female athletes. *Collegium antropologicum*, *40*(2), 111-122.

- Štefanovský, M., Péterová, A., Vanderka, M., & Lengvarský, L. (2016). Influence of selected phases of the menstrual cycle on performance in Special judo fitness test and Wingate test. *Acta Gymnica*, 46(3), 136-142.
- Steffensen, C. H., Roepstorff, C., Madsen, M., & Kiens, B. (2002). Myocellular triacylglycerol breakdown in females but not in males during exercise. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 282(3), E634-E642.
- Steinberg, G. R., Watt, M. J., McGee, S. L., Chan, S., Hargreaves, M., Febbraio, M. A., ... & Kemp, B. E. (2006). Reduced glycogen availability is associated with increased AMPK α 2 activity, nuclear AMPK α 2 protein abundance, and GLUT4 mRNA expression in contracting human skeletal muscle. *Applied physiology, nutrition, and metabolism*, 31(3), 302-312.
- Stephenson, L. A., & Kolka, M. A. (1993). Thermoregulation in women. *Exercise and sport sciences reviews*, 21(1), 231-262.
- Stepinski, M., Ceylan, H. I., & Zwierko, T. (2020). Seasonal variation of speed, agility and power performance in elite female soccer players: Effect of functional fitness. *Physical Activity Review*, 1(8), 16-25.
- Stoffel-Wagner, B. (2001). Neurosteroid metabolism in the human brain. *European Journal of Endocrinology*, 145(6), 669-679.
- Stølen, T., Chamari, K., Castagna, C., & Wisløff, U. (2005). Physiology of soccer: an update. *Sports medicine*, 35, 501-536.
- Strehlow, K., Rotter, S., Wassmann, S., Adam, O., Grohé, C., Laufs, K., ... & Nickenig, G. (2003). Modulation of antioxidant enzyme expression and function by estrogen. *Circulation research*, 93(2), 170-177.
- Stupka, N., Lowther, S., Chorneyko, K., Bourgeois, J. M., Hogben, C., & Tarnopolsky, M. A. (2000). Gender differences in muscle inflammation after eccentric exercise. *Journal of applied physiology*, 89(6), 2325-2332.
- Stupka, N., & Tiidus, P. M. (2001). Effects of ovariectomy and estrogen on ischemia-reperfusion injury in hindlimbs of female rats. *Journal of applied physiology*, 91(4), 1828-1835.
- Sugioka, K., Shimosegawa, Y., & Nakano, M. (1987). Estrogens as natural antioxidants of membrane phospholipid peroxidation. *FEBS letters*, 210(1), 37-39.
- Suh, S. H., Casazza, G. A., Horning, M. A., Miller, B. F., & Brooks, G. A. (2002). Luteal and follicular glucose fluxes during rest and exercise in 3-h postabsorptive women. *Journal of Applied Physiology*, 93(1), 42-50.
- Sunderland, C., & Nevill, M. (2003). Effect of the menstrual cycle on performance of intermittent, high-intensity shuttle running in a hot environment. *European journal of applied physiology*, 88, 345-352.
- Sundgot-Borgen, J., & Torstveit, M. K. (2007). The female football player, disordered eating, menstrual function and bone health. *British journal of sports medicine*, 41(suppl 1), i68-i72.
- Sundström Poromaa, I., & Gingnell, M. (2014). Menstrual cycle influence on cognitive function and emotion processing—from a reproductive perspective. *Frontiers in neuroscience*, 8, 380.
- Sung, E., Han, A., Hinrichs, T., Vorgerd, M., Machado, C., & Platen, P. (2014). Effects of follicular versus luteal phase-based strength training in young women. *Springerplus*, 3(1), 1-10.
- Sutton, K. M., & Bullock, J. M. (2013). Anterior cruciate ligament rupture: differences between males and females. *JAAOS-Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 21(1), 41-50.
- Sze, J. Y., Victor, M., Loer, C., Shi, Y., & Ruvkun, G. (2000). Food and metabolic signalling defects in a *Caenorhabditis elegans* serotonin-synthesis mutant. *Nature*, 403(6769), 560-564.

- Szmuilowicz, E. D., Adler, G. K., Williams, J. S., Green, D. E., Yao, T. M., Hopkins, P. N., & Seely, E. W. (2006). Relationship between aldosterone and progesterone in the human menstrual cycle. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, *91*(10), 3981-3987.
- Takahashi, H., Inaki, M., Fujimoto, K., Katsuta, S., Anno, I., Nütsu, M., & Itai, Y. (1995). Control of the rate of phosphocreatine resynthesis after exercise in trained and untrained human quadriceps muscles. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, *71*, 396-404.
- Takeda, T., Imoto, Y., Nagasawa, H., Muroya, M., & Shiina, M. (2015). Premenstrual syndrome and premenstrual dysphoric disorder in Japanese collegiate athletes. *Journal of pediatric and adolescent gynecology*, *28*(4), 215-218.
- Tarnopolsky, M. A. (2008). Sex differences in exercise metabolism and the role of 17-beta estradiol. *Medicine and science in sports and exercise*, *40*(4), 648-654.
- Tasmektepligil, M. Y., Agaoglu, S. A., Türkmen, L., & Türkmen, M. (2010). The motor performance and some physical characteristics of the sportswomen and sedentary lifestyle women during menstrual cycle. *Arch Budo*, *6*(4), 195-203.
- Taylor, J. W. (1979). The timing of menstruation-related symptoms assessed by a daily symptom rating scale. *Acta Psychiatrica Scandinavica*, *60*(1), 87-105.
- Tenan, M. S., Peng, Y. L., Hackney, A. C., & Griffin, L. (2013). Menstrual cycle mediates vastus medialis and vastus medialis oblique muscle activity. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *45*(11), 2151-2157.
- Tenan, M. S., Brothers, R. M., Tweedell, A. J., Hackney, A. C., & Griffin, L. (2014). Changes in resting heart rate variability across the menstrual cycle. *Psychophysiology*, *51*(10), 996-1004. *training*, *37*(3), 275.
- Tenan, M. S., Hackney, A. C., & Griffin, L. (2016). Maximal force and tremor changes across the menstrual cycle. *European Journal of Applied Physiology*, *116*, 153-160.
- Tenga, A., Zubillaga, A., Caro, O., & Fradua, L. (2015). Explorative study on patterns of game structure in male and female matches from elite Spanish soccer. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, *15*(1), 411-423.
- Tiidus, P. M., Bombardier, E., Hidioglou, N., & Madere, R. (1998). Estrogen administration, postexercise tissue oxidative stress and vitamin C status in male rats. *Canadian journal of physiology and pharmacology*, *76*(10-11), 952-960.
- Tiidus, P. M. (2000). Estrogen and gender effects on muscle damage, inflammation, and oxidative stress. *Canadian Journal of Applied Physiology*, *25*(4), 274-287.
- Tiidus, P. M. (2001). Oestrogen and sex influence on muscle damage and inflammation: evidence from animal models. *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care*, *4*(6), 509-513.
- Tiidus, P. M. (2003). Influence of estrogen on skeletal muscle damage, inflammation, and repair. *Exercise and sport sciences reviews*, *31*(1), 40-44.
- Thompson, B., Almarjawi, A., Sculley, D., & Janse de Jonge, X. (2020). The effect of the menstrual cycle and oral contraceptives on acute responses and chronic adaptations to resistance training: a systematic review of the literature. *Sports Medicine*, *50*, 171-185.
- Tomlin, D. L., & Wenger, H. A. (2001). The relationship between aerobic fitness and recovery from high intensity intermittent exercise. *Sports Medicine*, *31*, 1-11.

- Torres, M. J., Kew, K. A., Ryan, T. E., Pennington, E. R., Lin, C. T., Buddo, K. A., ... & Neuffer, P. D. (2018). 17 β -Estradiol directly lowers mitochondrial membrane microviscosity and improves bioenergetic function in skeletal muscle. *Cell metabolism*, 27(1), 167-179.
- Toth, M. J., Cooper, B. C., Pratley, R. E., Mari, A., Matthews, D. E., & Casson, P. R. (2008). Effect of ovarian suppression with gonadotropin-releasing hormone agonist on glucose disposal and insulin secretion. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 294(6), E1035-E1045.
- Tounsi, M. (2018). Soccer-related performance in eumenorrheic Tunisia...
- Trewin, J., Meylan, C., Varley, M. C., & Cronin, J. (2018a). The match-to-match variation of match-running in elite female soccer. *Journal of science and medicine in sport*, 21(2), 196-201.
- Trewin, J., Meylan, C., Varley, M. C., Cronin, J., & Ling, D. (2018b). Effect of match factors on the running performance of elite female soccer players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 32(7), 2002-2009.
- Tsmpoukos, A., Peckham, E. A., James, R., & Nevill, M. E. (2010). Effect of menstrual cycle phase on sprinting performance. *European journal of applied physiology*, 109, 659-667.
- Tscholl, P., O'Riordan, D., Fuller, C. W., Dvorak, J., Gutzwiller, F., & Junge, A. (2007). Causation of injuries in female football players in top-level tournaments. *British journal of sports medicine*, 41(suppl 1), i8-i14.
- Turpin, N. A., Guével, A., Durand, S., & Hug, F. (2011). Fatigue-related adaptations in muscle coordination during a cyclic exercise in humans. *Journal of Experimental Biology*, 214(19), 3305-3314.
- Uotinen, N., Puustinen, R., Pasanen, S., Manninen, T., Kivineva, M., Syväälä, H., ... & Ylikomi, T. (1999). Distribution of progesterone receptor in female mouse tissues. *General and comparative endocrinology*, 115(3), 429-441.
- Uranga, A. P., Levine, J., & Jensen, M. (2005). Isotope tracer measures of meal fatty acid metabolism: reproducibility and effects of the menstrual cycle. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 288(3), E547-E555.
- Vaiksaar, S., Jürimäe, J., Mäestu, J., Purge, P., Kalytka, S., Shakhlina, L., & Jürimäe, T. (2011). No effect of menstrual cycle phase and oral contraceptive use on endurance performance in rowers. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(6), 1571-1578.
- Verrilli, L., Blanchard, H., Landry, M., & Stanic, A. (2018). Prevalence and predictors of oligomenorrhea and amenorrhea in division 1 female athletes. *Fertility and Sterility*, 110(4), e245.
- Vescovi, J. D. (2014). Impact of maximum speed on sprint performance during high-level youth female field hockey matches: Female Athletes in Motion (FAiM) study. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(4), 621-626.
- Vescovi, J. D., & Falenchuk, O. (2019). Contextual factors on physical demands in professional women's soccer: female athletes in motion study. *European journal of sport science*, 19(2), 141-146.
- Vescovi, J. D., & Favero, T. G. (2014). Motion characteristics of women's college soccer matches: Female Athletes in Motion (FAiM) study. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(3), 405-414.
- Vieira-Potter, V. J., Padilla, J., Park, Y. M., Welly, R. J., Scroggins, R. J., Britton, S. L., ... & Thyfault, J. P. (2015). Female rats selectively bred for high intrinsic aerobic fitness are protected from ovariectomy-associated metabolic dysfunction. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 308(6), R530-R542.
- Wallace, J. L., & Norton, K. I. (2014). Evolution of World Cup soccer final games 1966–2010: Game structure, speed and play patterns. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 17(2), 223-228.

- Wang, S. H., & Qin, Y. (2020). Analysis of shooting and goal scoring patterns in the 2019 France Women's World Cup. *Journal of Physical Education and Sport*, 20(6), 3080-3089.
- Wattanapernpool, J., Riabroy, T., & Preawnim, S. (2000). Estrogen supplement prevents the calcium hypersensitivity of cardiac myofilaments in ovariectomized rats. *Life sciences*, 66(6), 533-543.
- Warren, G. L., O'farrell, L., Rogers, K. R., Billings, K. M., Sayers, S. P., & Clarkson, P. M. (2006). CK-MM autoantibodies: Prevalence, immune complexes, and effect on CK clearance. *Muscle & Nerve: Official Journal of the American Association of Electrodiagnostic Medicine*, 34(3), 335-346.
- West, D. W., Lee-Barthel, A., McIntyre, T., Shamim, B., Lee, C. A., & Baar, K. (2015). The exercise-induced biochemical milieu enhances collagen content and tensile strength of engineered ligaments. *The Journal of physiology*, 593(20), 4665-4675.
- Wierman, M. E. (2007). Sex steroid effects at target tissues: mechanisms of action. *Advances in physiology education*, 31(1), 26-33.
- Wiik, A., Ekman, M., Morgan, G., Johansson, O., Jansson, E., & Esbjörnsson, M. (2005). Oestrogen receptor β is present in both muscle fibres and endothelial cells within human skeletal muscle tissue. *Histochemistry and cell biology*, 124, 161-165.
- Wiik, A., Ekman, M., Johansson, O., Jansson, E., & Esbjörnsson, M. (2009). Expression of both oestrogen receptor alpha and beta in human skeletal muscle tissue. *Histochemistry and cell biology*, 131, 181-189.
- Willett, H. N., Koltun, K. J., & Hackney, A. C. (2021). Influence of menstrual cycle estradiol- β -17 fluctuations on energy substrate utilization-oxidation during aerobic, endurance exercise. *International journal of environmental research and public health*, 18(13), 7209.
- Willoughby, D. S., & Wilborn, C. D. (2006). Estradiol in females may negate skeletal muscle myostatin mRNA expression and serum myostatin propeptide levels after eccentric muscle contractions. *Journal of sports science & medicine*, 5(4), 672.
- Winther, A. K., Baptista, I., Pedersen, S., Randers, M. B., Johansen, D., Krstrup, P., & Pettersen, S. A. (2022). Position specific physical performance and running intensity fluctuations in elite women's football. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 32, 105-114.
- Wisloeff, U., Helgerud, J., & Hoff, J. (1998). Strength and endurance of elite soccer players. *Medicine and science in sports and exercise*, 30(3), 462-467.
- Wismann, J., & Willoughby, D. (2006). Gender differences in carbohydrate metabolism and carbohydrate loading. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 3(1), 28.
- Wisløff, U., Castagna, C., Helgerud, J., Jones, R., & Hoff, J. (2004). Strong correlation of maximal squat strength with sprint performance and vertical jump height in elite soccer players. *British journal of sports medicine*, 38(3), 285-288.
- Withers, S. G., Shechosky, S., & Madsen, N. B. (1982). Pyridoxal phosphate is not the acid catalyst in the glycogen phosphorylase catalytic mechanism. *Biochemical and biophysical research communications*, 108(1), 322-328.
- Wohlgemuth, K. J., Arieta, L. R., Brewer, G. J., Hoselton, A. L., Gould, L. M., & Smith-Ryan, A. E. (2021). Sex differences and considerations for female specific nutritional strategies: a narrative review. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 18(1), 27.
- Wojtys, E. M., Huston, L. J., Boynton, M. D., Spindler, K. P., & Lindenfeld, T. N. (2002). The effect of the menstrual cycle on anterior cruciate ligament injuries in women as determined by hormone levels. *The American journal of sports medicine*, 30(2), 182-188.

- Yim, J., Petrofsky, J., & Lee, H. (2018). Correlation between mechanical properties of the ankle muscles and postural sway during the menstrual cycle. *The Tohoku journal of experimental medicine*, 244(3), 201-207.
- Young, W. B., Pryor, J. F., & Wilson, G. J. (1995). Effect of instructions on characteristics of countermovement and drop jump performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 9(4), 232-236.
- Young, W., Mc Lean, B., & Ardagna, J. (1995). Relationship between strength qualities and sprinting performance. *Journal of sports medicine and physical fitness*, 35(1), 13-19.
- Young, W. B., James, R., & Montgomery, I. (2002). Is muscle power related to running speed with changes of direction?. *Journal of sports medicine and physical fitness*, 42(3), 282-288.
- Zderic, T. W., Coggan, A. R., & Ruby, B. C. (2001). Glucose kinetics and substrate oxidation during exercise in the follicular and luteal phases. *Journal of applied physiology*, 90(2), 447-453.
- Ziomkiewicz, A., Ellison, P. T., Lipson, S. F., Thune, I., & Jasienska, G. (2008). Body fat, energy balance and estradiol levels: a study based on hormonal profiles from complete menstrual cycles. *Human Reproduction*, 23(11), 2555-2563.
- Zubillaga, A., Gabbett, T. J., Fradua, L., Ruiz-Ruiz, C., Caro, Ó., & Ervillala, R. (2013). Influence of ball position on playing space in Spanish elite women's football match-play. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 8(4), 713-722.

PARTIE V

ANNEXES SCIENTIFIQUES

1. Publications scientifiques

1.1. Publications, premier auteur

Igonin, P. H., Rogowski, I., Boisseau, N., & Martin, C. (2022). Impact of the menstrual cycle phases on the movement patterns of sub-elite women soccer players during competitive matches. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(8), 4465.

[En cours de révision ; Science and Medecine in Football] **Igonin, P.H.**, Cognasse, F., Gonzalo, P., Philippot, R., Rogowski, I., Sabot, T., Boisseau, N., & Martin, C. Differential effects of menstrual cycle on key déterminants of performance in sub-elite women football players.

1.2. Publication, co-auteur

Zhang, Q., Dellal, A., Chamari, K., **Igonin, P. H.**, Martin, C., & Hautier, C. (2022). The influence of short sprint performance, acceleration, and deceleration mechanical properties on change of direction ability in soccer players—A cross-sectional study. *Frontiers in Physiology*, 2209.



OPEN ACCESS

EDITED BY

Lilian Lacourpaille,
Université de Nantes, France

REVIEWED BY

Tomás T. Freitas,
Universidad Católica San Antonio de
Murcia, Spain
Roland Van Den Tillaar,
Nord University, Norway

*CORRESPONDENCE

Qingshan Zhang,
zhang.qingshan@hotmail.com

SPECIALTY SECTION

This article was submitted to Exercise
Physiology,
a section of the journal
Frontiers in Physiology

RECEIVED 25 August 2022

ACCEPTED 03 October 2022

PUBLISHED 02 November 2022

CITATION

Zhang Q, Dellal A, Chamari K,
Igonin P-H, Martin C and Hautier C
(2022), The influence of short sprint
performance, acceleration, and
deceleration mechanical properties on
change of direction ability in soccer
players—A cross-sectional study.
Front. Physiol. 13:1027811.
doi: 10.3389/fphys.2022.1027811

COPYRIGHT

© 2022 Zhang, Dellal, Chamari, Igonin,
Martin and Hautier. This is an open-
access article distributed under the
terms of the [Creative Commons
Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). The use,
distribution or reproduction in other
forums is permitted, provided the
original author(s) and the copyright
owner(s) are credited and that the
original publication in this journal is
cited, in accordance with accepted
academic practice. No use, distribution
or reproduction is permitted which does
not comply with these terms.

The influence of short sprint performance, acceleration, and deceleration mechanical properties on change of direction ability in soccer players—A cross-sectional study

Qingshan Zhang^{1,2*}, Alexandre Dellal^{2,3,4}, Karim Chamari^{5,6},
Pierre-Hugues Igonin^{2,7}, Cyril Martin² and Christophe Hautier²

¹School of Athletic Performance, Shanghai University of Sport, Shanghai, China, ²Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité, Université de Lyon, UCBL1, UFRSTAPS, Villeurbanne Cedex, France, ³FIFA Medical Centre of Excellence, Centre orthopédique Santy, Sport Science and Research Department, Lyon, France, ⁴Mycoach Pro & Mycoach Performance, Performance department, Nice, France, ⁵Aspetar, Orthopaedic and Sports Medicine Hospital, FIFA Medical Centre of Excellence, Doha, Qatar, ⁶ISSEP Ksar-Said, La Manouba University, Tunis, Tunisia, ⁷Association Sportive de Saint-Etienne (ASSE), Saint-Etienne, France

The study investigated the relationship between short sprint performance and mechanical parameters obtained during the acceleration and deceleration tasks with the change of direction (COD) performance in female and male soccer players. The acceleration and deceleration ability were compared in the “High/Fast” versus “Low/Slow” COD performance group based on a median split analysis in each sex group. One hundred three French soccer players were assessed for the sprinting Force-Velocity (F-V) profile (i.e., theoretical maximal force [F₀], velocity [V₀], power [P_{max}]), 10 m performance, linear deceleration test (maximal braking force [HBF_{max}], braking power [BP_{max}], deceleration [Dec_{max}]), and COD performance using 505-test. The 10 m performance was strongly associated with 505-test performance (ES = [0.64 to 0.71]), whereas the sprinting F-V profiles parameters were weakly to moderately correlated with 505-test performance (ES = [-0.47 to -0.38]). The BP_{max} was also moderately associated with 505-test performance (ES: range = [-0.55 to -0.46]). In addition, the High/Fast female COD group presented higher F₀, P_{max}, HBF_{max}, and BP_{max} than the Low/Slow group, whereas the male groups presented very few mechanical differences. Multiple regression analysis shows that the COD performance of male players was determined by 10 m performance and maximum deceleration power. In contrast, no statistically significant model could be found to determine the change of direction performance in female players. In conclusion, the current finding indicated that the only variable strongly associated with COD performance was the linear 10 m sprint time. In the same way, the mechanical parameters obtained from acceleration and deceleration seemed to play a non-neglectable role in this population.

KEYWORDS

sprint, propulsive force, braking force, COD, football

Introduction

Change of direction (COD) while sprinting at high speed is essential in most team sports, such as soccer or rugby. To date, the optimal COD performance has been demonstrated to be influenced by numerous factors, including the sprint performance (Sayers, 2015), lower limb strength (Jones et al., 2017; Harper et al., 2021), reactive strength (Castillo-Rodriguez et al., 2012), body stability (Sasaki et al., 2011) and braking technique (Brughelli et al., 2008). Evaluation of COD performance can be done with different tests. Still, one of the most commonly used tests is the 505-test, which consists of four phases: an initial acceleration, a deceleration, a 180-degree COD, and a re-acceleration. Still, athletes can have widely varying abilities in the different components of these explosive capacities.

Acceleration during running requires the athlete to move their body forward rapidly while producing the highest horizontal propulsion force. Previous studies have shown that acceleration ability correlates with performance on the 505-test (Little and Williams, 2005; Buchheit et al., 2014; Loturco et al., 2019; Baena-Raya et al., 2021a). For example, Loturco et al. found that athletes with better COD performance exhibited shorter 5-m sprint times (Loturco et al., 2019). Recently, Baena et al. (2021) demonstrated that the variable that displayed a strong association with COD performance was short sprint time (10m, $r > 0.7$) (Baena-Raya et al., 2021b). In addition, considering that propulsive force may play a critical role in determining acceleration capacity, Baena-Raya et al. (Baena-Raya et al., 2021a) investigated the influence of sprint mechanical properties assessed by the Force-Velocity (F-V) profile on 505-test performance. They reported that maximum power (P_{max}) ($r = -0.82$) and velocity ($V0$) ($r = -0.76$) of sprinting were strongly correlated with 505-test performance in female futsal players. Additionally, while there is a large amount of literature on the kinematics and kinetics of the acceleration phase in sprinting and the links to the F-V relationship have been extensively studied (Samozino et al., 2022), the determinants of the deceleration have been less studied. The deceleration task is employed to rapidly stop or decrease the body's center of mass to prepare for the change of direction movement prior to the re-acceleration (Dos'Santos et al., 2017; Jones et al., 2017). The athlete must produce high braking forces to decelerate quickly. Jones et al. (Jones et al., 2017) measured large ground reaction forces during the penultimate and final foot contact before the change of direction (i.e., the 505-test) in female soccer players. Their results indicate that players producing the highest braking force have the best COD performance because it allows them to make a faster transition between the end of braking (e.g., penultimate and earlier foot contacts) and the re-acceleration

(Spiteri et al., 2015). In addition, some previous research has indicated that the deceleration deficit is essential in determining the 505-test performance (Clarke et al., 2020). Although the above findings suggest that deceleration capacity is a critical factor in COD performance, our understanding of the association between deceleration capacity and COD performance is not extensive to date. Studying the braking force and power production during the deceleration phase should make it possible to characterize better the mechanical properties essential to high COD performance in this field. Furthermore, it has been shown that male athletes performed better COD performances and higher sprint F-V mechanical properties than female athletes (Zhang et al., 2021b; Freitas et al., 2021); nonetheless, few studies have investigated the influence of the mechanical properties obtained from the deceleration in different sexes. As a result, it is also essential to determine whether sex differences induce the special relationship between acceleration and deceleration abilities and COD performance based on the differences in physical skills and match activity profiles reported between the male and female players.

Therefore, the purpose of the present study was to 1) determine the relationships between acceleration and deceleration capabilities and COD performance, 2) compare acceleration and deceleration capabilities in athletes with High *versus* Low COD performance, and 3) attempt to build a model of COD performance in female and male soccer players. We hypothesized that COD performance 1) would be influenced by acceleration and deceleration force and power, 2) the High COD performance represents better acceleration and deceleration capabilities, and 3) the predictive COD performance models would differ between male and female soccer players.

Materials and methods

Experimental approach

The present study used a cross-sectional design to investigate the relationship between acceleration, deceleration, and COD performance in team sports players. The protocol consisted of experimental testing sessions, including acceleration, linear deceleration, and the 505 test in random order. All participants performed a standardized 20-min dynamic warm-up protocol on the field-specific to soccer. After ~6 min of recovery, participants performed in random order two accelerations, two decelerations, and two 505-tests from a crouched position (staggered stance) with a recovery period of 4 min and 10 min between each trial and each test, respectively.

TABLE 1 Intra Coefficient Correlation (ICC) for the COD performance, 10-m sprint time, and mechanical parameters of acceleration and deceleration. ICC = intraclass correlation coefficient; CV = coefficient of variation; SEM = standard error of the measurement.

		Female			Male		
		ICC	CV%	SEM	ICC	CV%	SEM
Acceleration	F0	0.91 [0.74; 0.97]	1.1	0.13	0.86 [0.6; 0.95]	0.9	0.12
	V0	0.84 [0.55; 0.95]	0.5	0.08	0.79 [0.44; 0.93]	0.6	0.1
	Pmax	0.92 [0.76; 0.97]	1.4	0.35	0.88 [0.67; 0.96]	1.1	0.31
	10-m	0.95 [0.83; 0.98]	0.5	0.02	0.81 [0.48; 0.94]	0.4	0.02
Deceleration	HBfmax	0.89 [0.66; 0.97]	1.5	0.24	0.9 [0.71; 0.97]	2.2	0.35
	BPmax	0.79 [0.41; 0.93]	1.3	0.77	0.8 [0.46; 0.93]	1.3	0.67
	Decmax	0.89 [0.66; 0.97]	1.5	0.25	0.95 [0.84; 0.98]	2.6	0.39
COD	505-R	0.82 [0.49; 0.94]	0.5	0.03	0.75 [0.34; 0.92]	0.3	0.01
	505-L	0.84 [0.57; 0.95]	0.4	0.02	0.76 [0.36; 0.93]	0.4	0.02

Participants

One hundred and three French amateur/semi-professional athletes (53 males and 50 females, height: 1.73 ± 1.1 vs. 1.66 ± 0.01 cm, mass: 70.48 ± 9.0 vs. 58.76 ± 6.88 kg, age: 19.04 ± 2.05 vs. 20.09 ± 3.24 years, training volume: 4.1 ± 1.0 vs. 7.3 ± 3.39 h week⁻¹, training experience: 10.96 ± 1.77 vs. 11.83 ± 3.23 years) volunteered to participate in this study. Subjects had been training at least four times per week for more than 8 years. The *a priori* sample size ($n = 100$) was calculated using G-Power 3.1 (Brunsbüttel, Germany) in the basic ANOVA test, which assumes a large effect size $f = 0.4$, error $\alpha = 0.05$, and $1 - \beta = 0.95$. All participants had no lower extremity injuries in the past 12 months. After being informed of the procedure, all participants gave written informed consent to participate in the protocol. Prior to the experiments, the participants followed their usual training program but did not perform any intense workouts or unusual matches 48 h before the protocol. The study was approved by the “XXX” ethics committee of XXX. All participants performed one session of habituation testing (sprint, deceleration, and COD running) and one session of maximal testing during the regular training session to decrease the effects of the circadian cycle. Participants performed sprinting, deceleration, and COD tests during the testing session.

Experimental sessions

Maximal acceleration test

A 30 m maximum sprint test assessed maximum acceleration capabilities. A Stalker Acceleration Testing

System (ATS) II radar device (Stalker ATS II, Applied Concepts, Dallas, TX, United States, 46.9 Hz) was attached to a sturdy tripod placed 5 m behind the starting line at the height of 0.9 m above the ground (corresponding approximately to the height of the subject’s center of mass) to record the speed-time curve during the sprint. Intermediate sprint times were recorded over 5 m and 10 m) using timing cells (Witty, Microgate®, Bolzano, Italy) set at the same height as the radar device. Athletes were encouraged to sprint “through” each distance marker (i.e., 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, 30 m) to ensure a complete maximum collection without deceleration. The mechanical properties of sprinting were assessed through the mechanical parameters of the Force-Velocity profile (i.e., F0, V0, P_{max}) according to the validated method of Samozino (Samozino et al., 2016).

Maximal deceleration test

Maximum deceleration performance was assessed by the 20 m linear deceleration test (Zhang et al., 2021a). Participants first began running in a maximal 20 m sprint. They were then instructed to stop as quickly as possible after the 20 m sprint (e.g., braking line) and return to the 20 m line by backpedaling. This created a clear change in velocity on the instantaneous velocity-time graph captured by the radar device and enabled the end of the deceleration phase to be easily identified (Harper et al., 2020). The start of the deceleration phase was defined as the moment of maximal velocity achieved during the 20 m sprint running. Furthermore, the end of the deceleration phase was defined

TABLE 2 Associations between acceleration and deceleration mechanical parameters and COD performance on left side (COD_L) and right side (COD_R) for female players. F₀: maximal theoretical force; V₀: maximal theoretical velocity; P_{max}: maximal power; 10 m: 10 m split time. HBF_{max}: maximum braking force; HBP_{max}: maximum braking power; Dec_{max}: maximum deceleration.

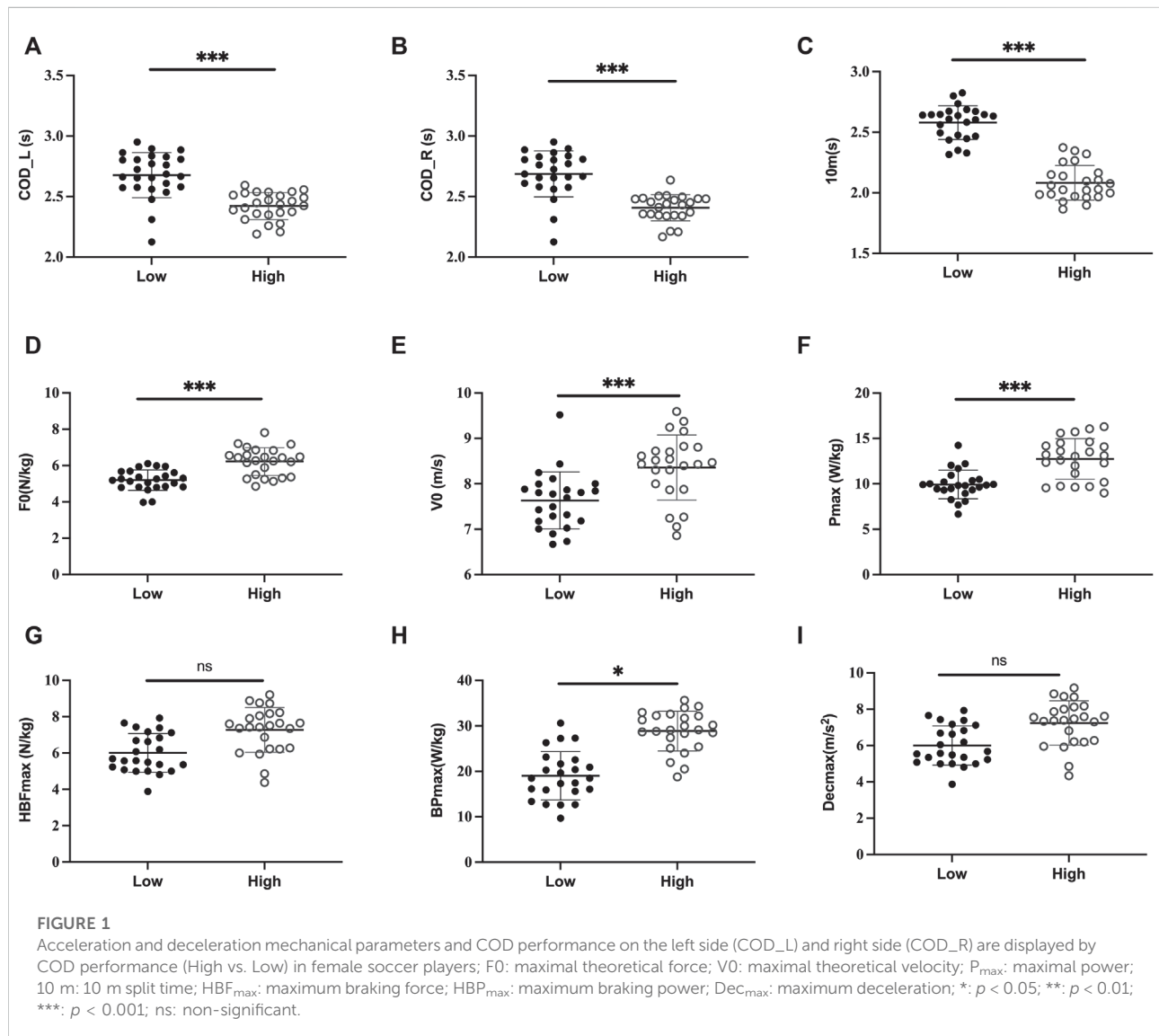
		Variable	Correlation coefficient, r (95 CI%) (95% CI)	Qualitative inference	p-value
COD_L	Acceleration	F ₀ (N.kg ⁻¹)	-0.38 [-0.6; -0.12]	Weak	0.01
		V ₀ (m.s ⁻¹)	-0.22 [-0.47; 0.06]	Weak	0.12
		P _{max} (W.kg ⁻¹)	-0.33 [-0.55; -0.06]	Weak	0.02
		10 m	0.62 [0.42; 0.77]	Strong	<0.001
	Deceleration	HBF _{max} (N.kg ⁻¹)	-0.42 [-0.62; -0.16]	Moderate	<0.001
		BP _{max} (W.kg ⁻¹)	-0.48 [-0.67; -0.23]	Moderate	<0.001
		Dec _{max} (m.s ⁻²)	-0.42 [-0.62; -0.16]	Moderate	<0.001
COD_R	Acceleration	F ₀ (N.kg ⁻¹)	-0.47 [-0.66; -0.22]	Moderate	0.01
		V ₀ (m.s ⁻¹)	-0.34 [-0.56; -0.07]	Weak	0.01
		P _{max} (W.kg ⁻¹)	-0.44 [-0.64; -0.19]	Moderate	<0.001
		10 m	0.67 [0.49; 0.8]	Strong	<0.001
	Deceleration	HBF _{max} (N.kg ⁻¹)	-0.36 [-0.58; -0.1]	Weak	0.01
		BP _{max} (W.kg ⁻¹)	-0.48 [-0.67; -0.24]	Moderate	<0.001
		Dec _{max} (m.s ⁻²)	-0.36 [-0.58; -0.09]	Weak	0.01

TABLE 3 Associations between acceleration and deceleration mechanical parameters and COD performance on the left side (COD_L) and right side (COD_R) for male players. F₀: maximal theoretical force; V₀: maximal theoretical velocity; P_{max}: maximal power; 10 m: 10 m split time; HBF_{max}: maximum braking force; HBP_{max}: maximum braking power; Dec_{max}: maximum deceleration.

		Variable	Correlation coefficient, r (95 CI%) (95% CI)	Qualitative inference	p-value
COD_L	Acceleration	F ₀ (N.kg ⁻¹)	-0.23 [-0.47; 0.05]	Weak	0.1
		V ₀ (m.s ⁻¹)	-0.48 [-0.66; -0.24]	Moderate	<0.001
		P _{max} (W.kg ⁻¹)	-0.45 [-0.64; -0.2]	Moderate	<0.001
		10-m	0.69 [0.52; 0.81]	Strong	<0.001
	Deceleration	HBF _{max} (N.kg ⁻¹)	-0.21 [-0.46; 0.06]	Weak	0.13
		BP _{max} (W.kg ⁻¹)	-0.54 [-0.71; -0.31]	Moderate	<0.001
		Dec _{max} (m.s ⁻²)	-0.21 [-0.45; 0.07]	Weak	0.14
COD_R	Acceleration	F ₀ (N.kg ⁻¹)	-0.22 [-0.46; 0.06]	Weak	0.12
		V ₀ (m.s ⁻¹)	-0.43 [-0.63; -0.17]	Moderate	<0.001
		P _{max} (W.kg ⁻¹)	-0.40 [-0.61; -0.15]	Moderate	<0.001
		10-m	0.70 [0.53; 0.82]	Strong	<0.001
	Deceleration	HBF _{max} (N.kg ⁻¹)	-0.12 [-0.38; 0.16]	Very weak	0.42
		BP _{max} (W.kg ⁻¹)	-0.45 [-0.64; -0.2]	Moderate	<0.001
		Dec _{max} (m.s ⁻²)	-0.11 [-0.37; 0.17]	Weak	0.42

as the lowest velocity following maximal velocity. Any 20 m time 5% slower than the best 20 m split time obtained during the sprint test was not considered for analysis. The radar device, as mentioned above, was used to record the speed-time curve during the deceleration phase. Kinetic and kinematic variables, including horizontal braking force (HBF), braking

power (BP), and deceleration (Dec) between the start and end of the deceleration phase, were calculated according to the previously validated method based on Newton's second law of motion (Harper et al., 2020). The maximal braking force (HBF_{max}), power (BP_{max}), and deceleration (Dec_{max}) were obtained as the highest value of all instantaneous HBF, BP,



and Dec values during the entire deceleration phase for data analysis.

505-test

The COD performance was assessed using the 505 change of direction test on the left side (COD_L) and right side (COD_R). Participants started the test 0.5 m behind the starting line, and the turning line was set at 15 m from the start line. A pair of timing gates (MicroGate Witty Timer System, Bolzano, Italy) was placed at 10 m in the front of the starting line, set at approximately hip height. The participants were instructed to accelerate as fast as possible to reach the turning line, then place the left or right foot on the turning line to turn around 180° and run back as quickly as possible for 5 m (Barber et al., 2016). The

COD performance was evaluated as the time to go from and return to the 10 m line.

Statistical analysis

Before performing the statistical analysis, the Shapiro–Wilk test was used to assess the normality of the data. The correlation (r) between the target variable of acceleration, deceleration, and COD performance was calculated using Pearson's or Spearman's correlation analysis with Holm correction. The magnitude of the correlation coefficient (r) was interpreted using criteria: very weak (0.11–0.19), weak (0.20–0.39), moderate (0.40–0.59), strong (0.60–0.79), and very strong (0.80–1.00). Within each sex group, players were also classified as High/Fast and Low/Slow using a median split based on the better COD performance to examine

acceleration and deceleration qualities further. A linear mixed model was then used to evaluate the fixed effect of gender (Male vs Female) and the COD qualities (High vs Low) with the random intercepts as a between-subject factor on the mechanical properties of acceleration (F0, V0, P_{max}, 10-m) and deceleration (HBF_{max}, BP_{max}, Dec_{max}), respectively. The effect size was calculated using partial eta-squared (η^2) to evaluate the magnitude of differences between the groups, giving the scale as small (0.01), medium (0.09), and large (0.25). Furthermore, a linear mixed-effects regression analysis was used to test the relationship between acceleration performance (fixed effect) and the corresponding deceleration mechanical parameters (fixed effects) as independent variables with the random intercepts as between-participants factors and COD performance as dependent variables. The effect size was calculated as $f^2 = \frac{r^2}{1-r^2}$, and interpreted using criteria: trivial (<0.02), low (0.02–0.15), medium (0.15–0.35) or high (>0.35). Within-test reliability was quantified using the intraclass correlation coefficient (ICC), coefficient of variation (CV), and standard error of the measurement (SEM). The ICC values were interpreted using criteria: excellent (>0.9), good (0.75–0.9), moderate (0.5–0.75), and poor (<0.5). The value of p was set at a 0.05 significance level. All statistical procedures were performed with R software (R 3.5.0, R Core Team, Vienna, Austria). Descriptive statistics are presented as mean \pm SD with 95% CI.

Results

The association between 10 m sprint performance, acceleration and deceleration ability, and COD performance were presented in **Tables 1, 2**. The 10 m sprint performance, acceleration, and deceleration ability, and COD performance were presented in **Table 4** and **Figures 1, 2**. The COD performance, 10-m sprint time, and mechanical parameters of acceleration and deceleration indicated good to excellent reliability (ICC = 0.75 ~ 0.95) with low variability (CV = 0.3 ~ 2.6) (**Table 1**).

Correlation between acceleration, deceleration, and COD performance

F0 and P_{max} showed a weak to moderate negative ($-0.47 < r < -0.38$; $p < 0.05$) association with COD performance of right and left side in female soccer players (**Table 2**). The V0 had a weak association with the COD_R performance ($r = 0.34$; $p = 0.01$), whereas no significant correlation was found between V0 and COD_L performance in female soccer players (**Table 2, Figure 1**). Additionally, V0 and P_{max} had a moderate negative correlation with the COD-test performance ($-0.47 < r < -0.40$; $p < 0.001$), whereas no association was found between F0 and 505-test performance, whatever the direction in male soccer players (**Table 3, Figure 2**). Notably, 10-m split time strongly correlated with 505 performances (all $p < 0.001$) irrespective of the direction and

gender (**Table 2, 3**). All the deceleration mechanical parameters had moderate association with the COD_L performance ($-0.5 < r < -0.41$; $p < 0.001$) in female soccer players (**Table 2**). Only BP_{max} had a moderate correlation with the COD_R ($p < 0.001$), whereas both HBF_{max} and Dec_{max} had a weak association ($r \approx -0.35$; $p = 0.01$) with the COD_R performance in female soccer players (**Table 2**). In male soccer players, only BP_{max} had moderate association with the COD_L ($p < 0.001$) and COD_R performances ($p < 0.001$) in both directions (**Table 3**). In contrast, no significant association was found between the HBF_{max}, Dec_{max} and COD performances (all $p > 0.05$, **Table 3**).

Differences in acceleration and deceleration performance between High/Fast and Low/Slow COD groups

The High/Fast COD group showed a higher 10-m split time and mechanical parameter of acceleration and deceleration with larger effect size ($0.24 < \eta^2 < 0.62$; $p < 0.001$), except for Dec_{max} ($\eta^2 = 0.05$; $p = 0.02$) compared to Low COD group in female soccer players (**Table 4; Figure 1, 2**). In contrast, High COD male group only showed higher 10-m performance and P_{max} ($\eta^2 = 0.08$; $p = 0.02$) and BP_{max} ($\eta^2 = 0.12$; $p < 0.001$) compared to the Low COD group (**Table 4; Figure 1, 2**).

Linear mixed-effects regression analysis

Furthermore, the linear mixed-effects regression analysis showed a significant relationship between COD_L performance and the combination of 10-m and Dec_{max} ($r^2 = 0.52$; $f^2 = 1.08$; $p < 0.001$; **Figure 3A**), 10-m and HBF_{max} in male soccer players ($r^2 = 0.53$; $f^2 = 1.13$; $p < 0.001$; **Figure 3B**), whereas no significant model was found in female soccer players.

Discussion

This study aimed to explore relationships between COD performance, 10 m sprint time, and the mechanical parameters of acceleration and deceleration in male and female soccer players. The main finding indicated that the 10-m sprint performance strongly correlates with COD performance in male and female players whereas the mechanical parameters of acceleration and deceleration presented weak to moderate correlations with COD performance.

Relationship between COD performance, 10 m sprint time, and F-V mechanical characteristics

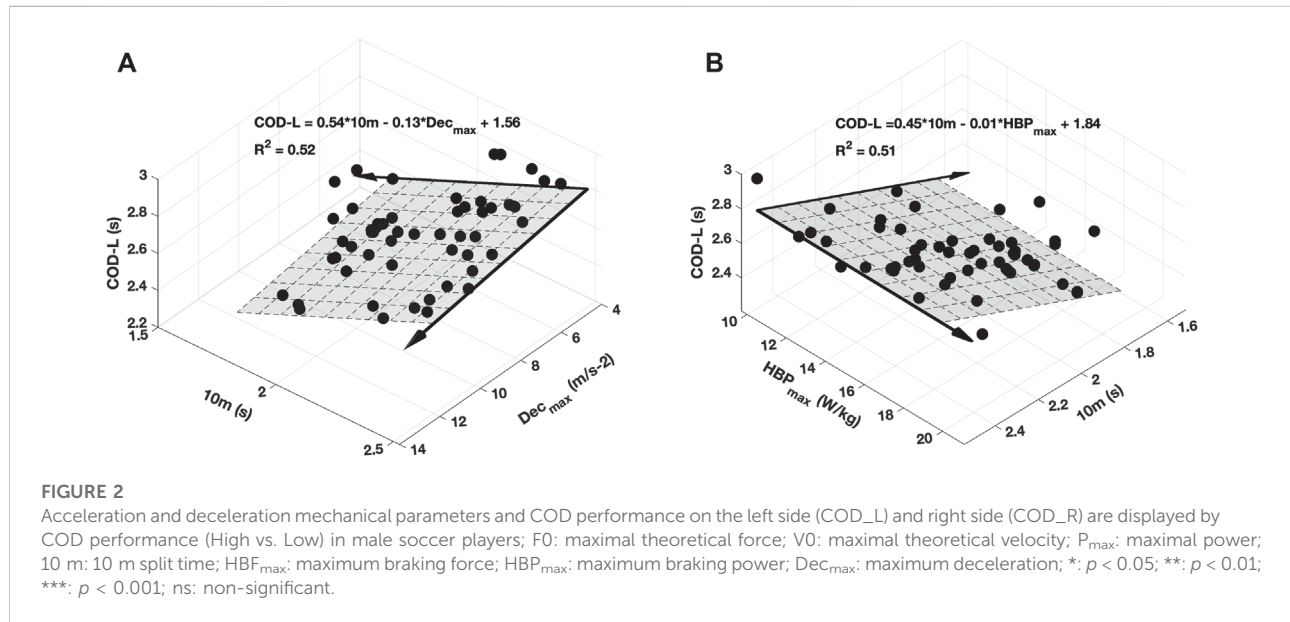
The present finding agrees with the previous studies reporting that the 10 m sprint performance is the primary

TABLE 4 Kinematic and kinetic variables during the acceleration, deceleration, and COD performance on the left side (COD_L) and right side (COD_R) were displayed by gender (Male vs. Female) and COD performance (High vs. Low), and the comparison by the COD performance. F_0 : maximal theoretical force; V_0 : maximal theoretical velocity; P_{max} : maximal power; 10 m: 10 m split time; HBF_{max} : maximum braking force; HBP_{max} : maximum braking power; Dec_{max} : maximum deceleration. All data are presented as mean \pm standard deviation with a 95% confidence interval. * Significant difference from COD level.

Gender	Variable	High/Fast		Low/Slow		Difference	p-value	Effect size(η^2)	Qualitative inference
		Mean \pm SD	[95% CI]	Mean \pm SD	[95% CI]				
Female (n = 50), High (n = 25), Low (n = 25)	COD_L (s)	2.42 \pm 0.11	[0.09; 0.15]	2.67 \pm 0.18	[0.12; 0.29]	0.26[0.17;0.34] *	<0.001	0.28	Large
	COD_R (s)	2.41 \pm 0.11	[0.08; 0.16]	2.68 \pm 0.19	[0.13; 0.3]	0.27[0.18; 0.36] *	<0.001	0.32	Large
	F_0 (N \cdot kg $^{-1}$)	6.22 \pm 0.76	[0.61; 1.04]	5.16 \pm 0.55	[0.43; 0.77]	-1.06[-1.44;-0.68] *	<0.001	0.35	Large
	V_0 (m \cdot s $^{-1}$)	8.36 \pm 0.72	[0.55; 1.02]	7.7 \pm 0.65	[0.47; 0.97]	-0.66[-1.05;-0.27] *	<0.001	0.32	Large
	P_{max} (W \cdot kg $^{-1}$)	12.74 \pm 2.24	[1.86; 2.94]	9.92 \pm 1.51	[1.05; 2.37]	-2.82[-3.92;-1.72] *	<0.001	0.24	Large
	10 m(s)	2.08 \pm 0.14	[0.11; 0.2]	2.55 \pm 0.18	[0.13; 0.26]	0.46[0.37; 0.56] *	<0.001	0.62	Large
	Dec_{max} (m \cdot s $^{-2}$)	7.24 \pm 1.22	[0.91; 1.78]	6.2 \pm 1.26	[1; 1.71]	-1.04 [-1.74;-0.34]	0.13	0.05	Small
	HBF_{max} (N \cdot kg $^{-1}$)	7.28 \pm 1.23	[0.92; 1.79]	6.21 \pm 1.26	[0.99; 1.72]	-1.07 [-1.78;-0.36]	0.11	0.06	Small
	BP_{max} (W \cdot kg $^{-1}$)	28.87 \pm 4.39	[3.31; 6.35]	19.98 \pm 6.16	[4.83; 8.49]	-8.89[-11.92;-5.86] *	0.02	0.27	Large
Male (n = 53), High (n = 26), Low (n = 27)	COD_L (s)	2.41 \pm 0.11	[0.08; 0.15]	2.66 \pm 0.16	[0.13; 0.22]	0.25[0.18; 0.33] **	<0.001	0.29	Large
	COD_R (s)	2.36 \pm 0.11	[0.09; 0.16]	2.6 \pm 0.14	[0.1; 0.21]	0.24[0.17; 0.31] *	<0.001	0.28	Large
	F_0 (N \cdot kg $^{-1}$)	6.98 \pm 0.7	[0.53; 1]	6.52 \pm 0.69	[0.57; 0.9]	-0.46 [-0.85;-0.08]	0.07	0.003	Small
	V_0 (m \cdot s $^{-1}$)	9.44 \pm 0.91	[0.63; 1.4]	8.92 \pm 0.61	[0.43; 0.94]	-0.52 [-0.95;-0.09]	0.056	0.08	Moderate
	P_{max} (W \cdot kg $^{-1}$)	15.91 \pm 1.4	[1.02; 2.07]	14.45 \pm 1.82	[1.38; 2.58]	-1.46[-2.35;-0.57] *	0.02	0.08	Moderate
	10 m(s)	1.83 \pm 0.08	[0.06; 0.11]	2.26 \pm 0.1	[0.08; 0.15]	0.44[0.39; 0.48] *	0.01	0.6	Large
	Dec_{max} (m \cdot s $^{-2}$)	7.71 \pm 1.8	[1.37; 2.57]	7.27 \pm 2.19	[1.69; 3.07]	-0.43 [-1.54; 0.67]	0.94	0.01	Small
	HBF_{max} (N \cdot kg $^{-1}$)	7.74 \pm 1.79	[1.36; 2.56]	7.34 \pm 2.17	[1.7; 2.98]	-0.41[-1.5; 0.69]	0.11	0.05	Small
	BP_{max} (W \cdot kg $^{-1}$)	33.16 \pm 3.96	[3.08; 5.5]	27.97 \pm 5.65	[4.31; 7.97]	-5.19[-7.88;-2.51] *	<0.001	0.12	Moderate

variable strongly related to COD performance (Gabbett et al., 2008; Loturco et al., 2019). This could be explained by the short running distance performed during this test, so the propulsive phase (i.e., acceleration, re-acceleration phase) takes approximately 65% of the COD tasks (Nimphius et al., 2013). Most studies indicated that the superior linear accelerating capacity expressed in the 10 m sprinting contributed to the faster COD performance. As a result, the higher short sprint performance allows players to reach the deceleration line quickly, contributing to better COD performance. On the other side, it

has been shown that the mechanical properties of sprinting reflect the athlete's ability to effectively apply a high level of force to the ground to move the body in the forward direction. This may partly explain the weak to moderate correlations between F_0 and P_{max} (Baena-Raya et al., 2021b) with COD performance. This study confirms the strong influence of 10 m sprint time on COD performance and suggested, it can be helpful to pay attention to the mechanical parameters obtained from sprinting to understand the COD performance better and improve this ability. This is particularly true



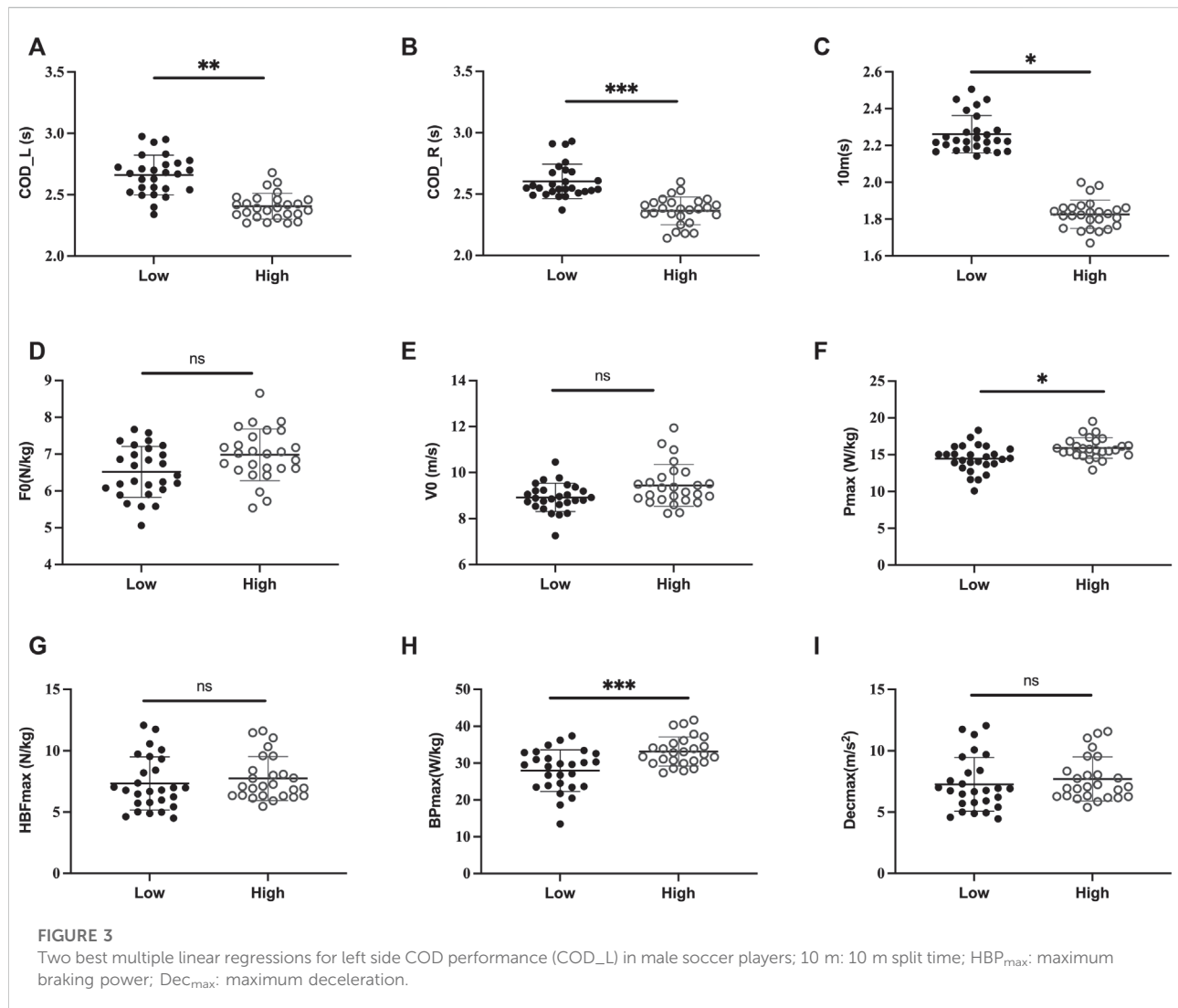
considering the demonstrated influence of the kinetic parameters on the sprint performance (Hunter et al., 2005; Buchheit et al., 2014; Colyer et al., 2018; Nagahara et al., 2018).

Interestingly, a relationship was found between 10 m sprint time, maximal deceleration and braking power, and COD performance in male players. Numerous studies have proposed that the deceleration phase before changing the direction might be critical for COD performance (Dos'Santos et al., 2017; Dos'Santos et al., 2019; Thomas et al., 2020b). For instance, some recent studies reported that faster athletes in the 505-test displayed greater horizontal braking force (GRF) over the penultimate and last foot contact (Dos'Santos et al., 2019; Thomas et al., 2020b) in line with the present finding. The current result supports these prior investigations by demonstrating the association of linear deceleration mechanical properties with COD performance in male and female soccer players. However, a weak to moderate significant relationship was observed, indicating that other factors like technical skills, training content, and/or morphological particularities could impact COD performance more than force and power production in acceleration and deceleration phases. Additionally, it is also important to note that the requirement of physical and mechanical demands during a competitive match depends on the playing position, which might induce the different physical performance outputs for the specific playing position, including acceleration, deceleration, and COD profile. For instance, the midfielder decelerates more frequently than accelerates and has a 30% higher performance in sprinting than strikers and fullbacks (Di Salvo et al., 2007). Moreover, the midfielders showed a higher COD performance than the goalkeeper, whereas there was no significant difference in sprinting performance (e.g., 10 m) between them (Bujnovky et al., 2019). Thus, the playing

position might contribute to the different output of deceleration ability following a similar COD performance and further studies are needed to explore this issue.

Mechanical acceleration and deceleration properties of High/Fast and Low/Slow COD performance

The mixed-effects linear regression (Gender & COD performance) indicated that the players showed distinct mechanical properties of acceleration and deceleration. As reported in previous studies, male soccer players always display a shorter 10 m sprint time and higher sprinting mechanical parameters compared to female soccer players (Jimenez-Reyes et al., 2019; Zhang et al., 2021b). It seems that male players accelerated faster and applied higher GRF during sprint running compared to females (F0: ~7.5 vs ~6.7); this subsequently produced a faster sprint performance (Spiteri et al., 2013; Spiteri et al., 2014) (10-m performance: ~1.9 s vs ~2.3 s). On the other hand, male players do not have the same advantage in terms of COD performance and deceleration abilities in agreement with McBurnie et al. (2021) (McBurnie et al., 2021). this could be due to the deceleration strategy before the change of direction moment such as a concept of 'self-regulation' tuning the approach velocity to better tolerate the kinetic energy (Hewit et al., 2011; Dos'Santos et al., 2018). This might also be due to a higher sprint momentum in male players compared to female players. Freitas et al. (2021) discussed that regarding the COD deficits, sprint momentum is a key outcome that potentially explains why men displayed higher values than females. Faster and heavier athletes need to apply higher braking forces through longer ground contact times to



compensate for a higher sprint momentum (Freitas et al., 2021). It should be noted that almost half of the female soccer players were recruited from the first France league division (1–2 training sessions per day), which underlines the physical quality of the sample of female players tested in this study. If the player could not apply higher braking forces through longer ground contact times when the sprint momentum and approach velocity are greater before changing direction, consequently, lower COD performance (Dos'Santos et al., 2018). As a result, the individuals' level and sports training experience may explain this discrepancy. Despite this difference in the level of play, the associations that have been established between the mechanical parameters of acceleration and deceleration and the ability to change direction remain relevant for both populations and provide new insights into the direction of training for male and female soccer players.

More importantly, the High/Fast and Low/Slow on the COD test in male players show a large difference in 10 m sprint time and P_{max} and BP_{max} differences concerning the mechanical parameters. This is another portion of the evidence that the metrics derived from the mechanical parameters profile obtained from acceleration and deceleration are not yet, capable of discriminating COD performance in male soccer players. On the other hand, female players with a Low/Slow COD performance show higher 10 m sprint time and much lower acceleration and deceleration mechanical parameters than those with High/Fast COD performance. This suggests that, in the female population, the differences in the level of play and training were very marked between the two groups and that the group of Low/Slow performers suffered from a substantial deficit of physical preparation, especially the sprint/acceleration training. This may explain the lack of significant multiple

correlations between acceleration, deceleration capacities, and COD performance obtained in the present study. Despite this, it is worth noting that the current finding highlights a deficit of BP_{max} in Low/Slow COD female performers. The lower limb neuromuscular capacities of female players who might display Low/Slow COD performance seem to be highly deficient. Further studies may determine if the F-V profile could be advantageous in evaluating COD performance in a homogenous female soccer players group.

Predictive COD performance models based on acceleration and deceleration abilities

Additionally, multiple linear regression shows a significant relationship between 10 m sprint time and HBF_{max} and Dec_{max} but only in male players, and the 10 m sprint time represented the higher regression coefficient (Figure 3). These findings are unsurprising, bringing further support to the paramount importance of the short sprint ability for COD performance compared to the deceleration capacity. In the basics of the previous study, the 10 m sprint time showed a higher correlation ($r \approx 0.7$) with COD performance (Lockie et al., 2018), whereas the deceleration ability only indicated a moderate effect on the COD performance (i.e., Average horizontal Ground Reaction Force, $d = -0.9$, $p = 0.05$) (McBurnie et al., 2021). It could be assumed that the 505-test and the method used to calculate mechanical parameters during linear deceleration revealed some limitations. Clarke et al. (2020) showed that approximately 78% of athletes would either over or underestimate their deceleration ability during the COD test (Clarke et al., 2020). Indeed, the 505 test does not allow athletes to reach the maximum sprint speed and, therefore, to take advantage of the maximum braking capabilities. Thus, the athlete did not require excessive time to decelerate; in contrast, they still needed higher sprint performance to complete the COD task as it would be advantageous to enter and exit the COD as fast as possible. Additionally, the measurement of the deceleration performance, for now, is still challenging because of the influence of the maximal velocity reached before the deceleration (Graham-Smith et al., 2018). Meanwhile, considering the multiple factors that could impact COD performance, an optimal COD strategy/technique could also be a determining factor in the COD performance (Thomas et al., 2020a; McBurnie et al., 2021). It is, consequently, a more specific test on which physical abilities may have less influence than technical abilities.

Limitation

Although our results indicated that certain mechanical parameters of acceleration and deceleration presented a weak

to moderate correlation with COD performance, 10 m sprint time was still the best predictor of COD performance. Further prospective and experimental research are needed to evaluate the potential interest in the F-V profile in COD performance. Additionally, due to the high impact of lower limb neuromuscular capacity on the acceleration (Morin et al., 2015) and deceleration ability (Zhang et al., 2021a), it could be valuable to evaluate the lower limb maximal concentric and eccentric torques, RTD, muscular activation to explain these results. Moreover, considering the influence of the angle of the change of direction, it is suggested to consider multi-directional maneuver and technical/strategical components (e.g., penultimate and final foot contact, trunk inclination, or hip angle). It could also be noted that the current study analyzed COD performance on the right vs left sides rather than on the dominant (DL) vs non-dominant (NDL) leg. However, it should be noted that there was no difference in the COD performances between the DL and NDL, and it was also observed that almost all the subjects started the sprint with their left foot forward regardless of their dominant foot. For these reasons, the analysis of the left-right side seems more relevant.

Conclusion

The present study aimed to estimate the magnitude of the association between different mechanical parameters derived from acceleration and deceleration and COD performance in male and female soccer players. Considering the large number of factors influencing COD performance, it seems that the short sprinting performance (i.e., 10-m) plays a critical role in determining COD performance. Furthermore, it seems that the computation of F-V parameters remains less reliable than time measurements but could provide some additional information to assess an athlete's ability to change direction. Although certain mechanical parameters of deceleration presented a moderate correlation with COD performance, it should be noted that these mechanical parameters have different influences on the COD performance in male and female soccer players.

Practical application

Based on the current finding, the ability to perform 10 m sprint times is critical/necessary to achieve high COD performance. Training programs should enhance fast sprint capability through heavy resistance and/or high-velocity training exercises. In addition, special muscle training, such as the eccentric force of quadriceps, might contribute to the high braking force production during the deceleration task (Zhang et al., 2021a). Moreover, the results obtained for women demonstrate the need to develop physical preparation even for amateurs.

Data availability statement

The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors, without undue reservation.

Ethics statement

The studies involving human participants were reviewed and approved by Sud-Est II of Lyon. The patients/participants provided their written informed consent to participate in this study.

Author contributions

QZ and CH conceived and designed the experiments and wrote the manuscript. QZ and PI performed the experiments. QZ and CH analyzed the data and contributed materials and analysis tools. AD, KC, PI, and CM provided critical feedback and contributed to the final version. All authors contributed to the article and approved the submitted version.

References

- Baena-Raya, A., García-Ortega, D., Sánchez-López, S., Soriano-Maldonado, A., Reyes, P. J., and Rodríguez-Pérez, M. A. (2021a). The influence of sprint mechanical properties on change of direction in female futsal players. *J. Hum. Kinet.* 79, 221–228. doi:10.2478/hukin-2021-0075
- Baena-Raya, A., Soriano-Maldonado, A., Conceição, F., Jiménez-Reyes, P., and Rodríguez-Pérez, M. A. (2021b). Association of the vertical and horizontal force-velocity profile and acceleration with change of direction ability in various sports. *Eur. J. Sport Sci.* 21 (12), 1659–1667. doi:10.1080/17461391.2020.1856934
- Barber, O. R., Thomas, C., Jones, P. A., McMahon, J. J., and Comfort, P. (2016). Reliability of the 505 change-of-direction test in netball players. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 11 (3), 377–380. doi:10.1123/ijsp.2015-0215
- Bughelli, M., Cronin, J., Levin, G., and Chaouachi, A. (2008). Understanding change of direction ability in sport: A review of resistance training studies. *Sports Med.* 38 (12), 1045–1063. doi:10.2165/00007256-200838120-00007
- Buchheit, M., Samozino, P., Glynn, J. A., Michael, B. S., Al Haddad, H., Mendez-Villanueva, A., et al. (2014). Mechanical determinants of acceleration and maximal sprinting speed in highly trained young soccer players. *J. Sports Sci.* 32 (20), 1906–1913. doi:10.1080/02640414.2014.965191
- Bujnovky, D., Maly, T., Ford, K. R., Sugimoto, D., Kunzmann, E., Hank, M., et al. (2019). Physical fitness characteristics of high-level youth football players: Influence of playing position. *Sports (Basel)* 7 (2), E46. doi:10.3390/sports7020046
- Castillo-Rodríguez, A., Fernandez-García, J. C., Chinchilla-Minguet, J. L., and Carnero, E. A. (2012). Relationship between muscular strength and sprints with changes of direction. *J. Strength Cond. Res.* 26 (3), 725–732. doi:10.1519/JSC.0b013e31822602db
- Clarke, R., Read, P. J., De Ste Croix, M. B. A., and Hughes, J. D. (2020). The deceleration deficit: A novel field-based method to quantify deceleration during change of direction performance. *J. Strength Cond. Res.* 36, 2434–2439. doi:10.1519/jsc.0000000000003856
- Colyer, S. L., Nagahara, R., and Salo, A. I. T. (2018). Kinetic demands of sprinting shift across the acceleration phase: Novel analysis of entire force waveforms. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 28 (7), 1784–1792. doi:10.1111/sms.13093
- Di Salvo, V., Baron, R., Tschan, H., Calderon Montero, F. J., Bachl, N., and Pigozzi, F. (2007). Performance characteristics according to playing position in elite soccer. *Int. J. Sports Med.* 28 (3), 222–227. doi:10.1055/s-2006-924294
- DosSantos, T., McBurnie, A., Thomas, C., Comfort, P., and Jones, P. A. (2019). Biomechanical determinants of the modified and traditional

Acknowledgments

The authors would like to thank all the participants who performed voluntarily and their best effort during the protocol.

Conflict of interest

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Publisher's note

All claims expressed in this article are solely those of the authors and do not necessarily represent those of their affiliated organizations, or those of the publisher, the editors and the reviewers. Any product that may be evaluated in this article, or claim that may be made by its manufacturer, is not guaranteed or endorsed by the publisher.

505 change of direction speed test. *J. Strength Cond. Res.* 34, 1285–1296. doi:10.1519/jsc.0000000000003439

DosSantos, T., Thomas, C., Comfort, P., and Jones, P. A. (2018). The effect of angle and velocity on change of direction biomechanics: An angle-velocity trade-off. *Sports Med.* 48 (10), 2235–2253. doi:10.1007/s40279-018-0968-3

DosSantos, T., Thomas, C., Jones, P. A., and Comfort, P. (2017). Mechanical determinants of faster change of direction speed performance in male athletes. *J. Strength Cond. Res.* 31 (3), 696–705. doi:10.1519/jsc.0000000000001535

Freitas, T. T., Alcaraz, P. E., Calleja-González, J., Arruda, A. F. S., Guerriero, A., Kobal, R., et al. (2021). Differences in change of direction speed and deficit between male and female national rugby sevens players. *J. Strength Cond. Res.* 35 (11), 3170–3176. doi:10.1519/jsc.0000000000003195

Gabbett, T. J., Kelly, J. N., and Sheppard, J. M. (2008). Speed, change of direction speed, and reactive agility of rugby league players. *J. Strength Cond. Res.* 22 (1), 174–181. doi:10.1519/JSC.0b013e31815ef700

Graham-Smith, P., Rumpf, M., and Jones, P. A. (2018). Assessment of deceleration ability and relationship to approach speed and eccentric strength. *ISBS Proc. Arch.* 36 (1), 8.

Harper, D. J., Jordan, A. R., and Kiely, J. (2021). Relationships between eccentric and concentric knee strength capacities and maximal linear deceleration ability in male academy soccer players. *J. Strength Cond. Res.* 35 (2), 465–472. doi:10.1519/JSC.0000000000002739

Harper, D. J., Morin, J. B., Carling, C., and Kiely, J. (2020). Measuring maximal horizontal deceleration ability using radar technology: Reliability and sensitivity of kinematic and kinetic variables. *Sports Biomech.*, 1–17. doi:10.1080/14763141.2020.1792968

Hewitt, J., Cronin, J., Button, C., and Hume, P. (2011). Understanding deceleration in sport. *Strength Cond. J.* 33 (1), 47–52. doi:10.1519/SSC.0b013e3181fbd62c

Hunter, J. P., Marshall, R. N., and McNair, P. J. (2005). Relationships between ground reaction force impulse and kinematics of sprint-running acceleration. *J. Appl. Biomech.* 21 (1), 31–43. doi:10.1123/ijsp.21.1.31

Jimenez-Reyes, P., Garcia-Ramos, A., Cuadrado-Penafiel, V., Parraga-Montilla, J. A., Morcillo-Losa, J. A., Samozino, P., et al. (2019). Differences in sprint mechanical force-velocity profile between trained soccer and futsal players. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 14 (4), 478–485. doi:10.1123/ijsp.2018-0402

Jones, P. A., Thomas, C., DosSantos, T., McMahon, J. J., and Graham-Smith, P. (2017). The role of eccentric strength in 180° turns in female soccer players. *Sports (Basel, Switz.)* 5 (2), 42. doi:10.3390/sports5020042

- Little, T., and Williams, A. G. (2005). Specificity of acceleration, maximum speed, and agility in professional soccer players. *J. Strength Cond. Res.* 19 (1), 76–78. doi:10.1519/14253.1
- Lockie, R. G., Dawes, J. J., and Jones, M. T. (2018). Relationships between linear speed and lower-body power with change-of-direction speed in national collegiate athletic association divisions I and II women soccer athletes. *Sports (Basel)* 6 (2), E30. doi:10.3390/sports6020030
- Loturco, I., Zanetti, V., and Bishop, C., (2019). Maximum acceleration performance of professional soccer players in linear sprints: Is there a direct connection with change-of-direction ability? *PLoS One* 14 (5), e0216806. doi:10.1371/journal.pone.0216806
- McBurnie, A. J., Dos'Santos, T., and Jones, P. A. (2021). Biomechanical associates of performance and knee joint loads during A 70-90° cutting maneuver in subelite soccer players. *J. Strength Cond. Res.* 35 (11), 3190–3198. doi:10.1519/jsc.0000000000003252
- Morin, J. B., Gimenez, P., Edouard, P., Arnal, P., Jimenez-Reyes, P., Samozino, P., et al. (2015). Sprint acceleration mechanics: The major role of hamstrings in horizontal force production. *Front. Physiol.* 6, 404. doi:10.3389/fphys.2015.00404
- Nagahara, R., Mizutani, M., Matsuo, A., Kanehisa, H., and Fukunaga, T. (2018). Association of sprint performance with ground reaction forces during acceleration and maximal speed phases in a single sprint. *J. Appl. Biomech.* 34 (2), 104–110. doi:10.1123/jab.2016-0356
- Nimphius, S., Geib, G., Spiteri, T., and Carlisle, D. (2013). Change of direction™ deficit measurement in Division I American football players. *J. Aust. Strength Cond.* 21 (S2), 115–117.
- Samozino, P., Peyrot, N., Edouard, P., Nagahara, R., Jimenez-Reyes, P., Vanwanseele, B., et al. (2022). Optimal mechanical force-velocity profile for sprint acceleration performance. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 32 (3), 559–575. doi:10.1111/sms.14097
- Samozino, P., Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Peyrot, N., Saez de Villarreal, E., et al. (2016). A simple method for measuring power, force, velocity properties, and mechanical effectiveness in sprint running. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 26 (6), 648–658. doi:10.1111/sms.12490
- Sasaki, S., Nagano, Y., Kaneko, S., Sakurai, T., and Fukubayashi, T. (2011). The relationship between performance and trunk movement during change of direction. *J. Sports Sci. Med.* 10 (1), 112–118.
- Sayers, M. G. (2015). Influence of test distance on change of direction speed test results. *J. Strength Cond. Res.* 29 (9), 2412–2416. doi:10.1519/jsc.0000000000001045
- Spiteri, T., Cochrane, J. L., Hart, N. H., Haff, G. G., and Nimphius, S. (2013). Effect of strength on plant foot kinetics and kinematics during a change of direction task. *Eur. J. Sport Sci.* 13 (6), 646–652. doi:10.1080/17461391.2013.774053
- Spiteri, T., Hart, N. H., and Nimphius, S. (2014). Offensive and defensive agility: A sex comparison of lower body kinematics and ground reaction forces. *J. Appl. Biomech.* 30 (4), 514–520. doi:10.1123/jab.2013-0259
- Spiteri, T., Newton, R. U., Binetti, M., Hart, N. H., Sheppard, J. M., and Nimphius, S. (2015). Mechanical determinants of faster change of direction and agility performance in female basketball athletes. *J. Strength Cond. Res.* 29 (8), 2205–2214. doi:10.1519/JSC.0000000000000876
- Thomas, C., Dos'Santos, T., Comfort, P., and Jones, P. A. (2020b). Effect of asymmetry on biomechanical characteristics during 180° change of direction. *J. Strength Cond. Res.* 34 (5), 1297–1306. doi:10.1519/jsc.0000000000003553
- Thomas, C., Dos'Santos, T., Comfort, P., and Jones, P. A. (2020a). Male and female soccer players exhibit different knee joint mechanics during pre-planned change of direction. *Sports Biomech.*, 1–14. doi:10.1080/14763141.2020.1830160
- Zhang, Q., Léam, A., Fouré, A., Wong, D. P., and Hautier, C. A. (2021a). Relationship between explosive strength capacity of the knee muscles and deceleration performance in female professional soccer players. *Front. Physiol.* 12, 723041. doi:10.3389/fphys.2021.723041
- Zhang, Q., Pommerell, F., Owen, A., Trama, R., Martin, C., and Hautier, C. A. (2021b). Running patterns and force-velocity sprinting profiles in elite training young soccer players: A cross-sectional study. *Eur. J. Sport Sci.* 21, 1718–1726. doi:10.1080/17461391.2020.1866078

2. Diffusion et valorisation des résultats

2.1. Communications orales lors de congrès nationaux

Igonin P.H., Boisseau N. & Martin C. *Les effets du cycle menstruel sur les facteurs de performance chez des footballeuses de haut niveau*. 12^{ème} Colloque International Football et Recherches, « Le Football pour et par les femmes ». Université Claude Bernard Lyon I, Lyon, Juin 2019.

Igonin P.H., Rogowski I., Boisseau N. & Martin C. *Soccer match activity during the menstrual cycle in elite French women soccer players*. 19^{ème} Congrès de l'Association des Chercheurs en Activités Physiques et Sportives. Montpellier, Octobre 2021.

Igonin P.H., Rogowski I., Boisseau N. & Martin C. *Soccer match activity during the menstrual cycle in elite French women soccer players*. 26^{ème} Journée scientifique de l'Ecole Doctorale Interdisciplinaire Sciences-Santé, Université Claude Bernard Lyon I, Lyon, Novembre 2021.

2.2. Communications orales lors de formations fédérales et nationales

Protocole CYMEFOOT, entre innovation et singularité à l'Association Sportive de Saint-Etienne. Réunion des préparateurs physiques « élite ». Fédération Française de Rugby (FFR), Marcoussis, Novembre 2020.

Physical Preparation & Menstrual Cycle. Elite Strength and Conditioning Course (ESC2). Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance (INSEP), Paris, Juin 2021.

2.3. Interviews et vulgarisation scientifique dans les médias

Les effets du cycle menstruel sur les facteurs de performance chez des footballeuses de haut niveau – Conférence « Femmes-Leadership-Sport de haut niveau », Rennes, Janvier 2019.

Entraînement sportif en fonction du cycle menstruel – 4^{ème} Sommet du cycle menstruel « autonomie gynécologique » en visioconférence, Kiffe ton cycle, France, Juin 2020.

<https://by.kiffetoncycle.fr/sk4-autonomie-gynecologique/>

Comment faire du cycle menstruel un atout professionnel ? – Interview web, Les Echos Start, Octobre 2019.

<https://start.lesechos.fr/travailler-mieux/vie-entreprise/comment-faire-du-cycle-menstruel-un-atout-professionnel-1174953>

L' A.S. Saint-Etienne s'intéresse à l'impact des règles sur les performances de ses joueuses – Interview radio, France Bleu Saint-Etienne Loire, Novembre 2019.

<https://www.francebleu.fr/sports/football/l-saint-etienne-s-interesse-a-l-effet-potentiel-des-regles-sur-les-performances-de-ses-joueuses-1573633266>

Et si mieux connaître notre cycle menstruel nous permettait d'être plus performante ? – Interview web, Marie Claire, Janvier 2020.

<https://www.marieclaire.fr/booster-performances-en-fonction-de-son-cycle-menstruel,1331914.asp>

Cycles menstruels : bientôt la révolution pour les joueuses françaises ? – Journal L'Equipe, Février 2020

<https://www.lequipe.fr/Football/Article/Cycles-menstruels-bientot-la-revolution-pour-les-joueuses-francaises/1114244>

« Règles, la fin d'un tabou », Comment utiliser les règles et le cycle menstruel à notre avantage en sport ? – Reportage TV, Téva, France télévision, Juillet 2020.

https://www.6play.fr/regles-la-fin-du-tabou--p_17283

« Cycle Menstruel et Sport » – Interview web, AESIO Mutuelle, Août 2021.

<https://www.youtube.com/watch?v=c3--sml99qo>

Football et performance : une étude sur le cycle des sportives – Journal L'Essor Loire, Août 2021.

<https://www.essor42.fr/foot-et-performance-une-etude-sur-le-cycle-des-sportives-27075.html#:~:text=Les%20travaux%20de%20th%C3%A8se%20de,football%20f%C3%A9minin%20de%20haut%20niveau.>

Résumé

À l'aube de la Coupe du Monde féminine de football 2023 en Australie et en Nouvelle-Zélande, le football féminin connaît une croissance constante, tant au niveau mondial qu'in situ en France. Ce sport intermittent se caractérise par une alternance entre des actions courtes et intenses, nécessitant également des temps de récupération variables. Ainsi, la performance physique des joueuses repose sur leur capacité à être rapides et à récupérer efficacement entre chaque action. Le cycle menstruel chez les femmes est marqué par d'importantes variations hormonales, entraînant de nombreuses modifications physiologiques. Dans un sport tel que le football, où les qualités physiques des joueuses sont déterminantes pour la performance, il est possible que le cycle menstruel puisse altérer certains paramètres physiologiques, ce qui reste encore peu étudié en raison des difficultés d'inclure des joueuses de haut niveau dans les protocoles de recherche.

Au cours de cette thèse, nous avons pu montrer que le cycle menstruel influence la performance physique des joueuses de football évaluée dans des situations écologiques, telles que les compétitions et/ou des entraînements. En effet, nous avons observé une diminution de la distance parcourue à haute intensité (entre 14 et 21 km.h⁻¹) lors de la phase folliculaire précoce (menstruations) pendant les matchs. De même, au cours de la phase folliculaire tardive, nous avons constaté une augmentation du nombre de sprints réalisés à des vitesses supérieures à 21 km.h⁻¹, ce qui a entraîné une modification du pattern de sprint des joueuses pendant cette phase. Ainsi, les joueuses effectuent un plus grand nombre de sprints courts en présence de concentrations en œstrogènes élevées et de concentrations de progestérone faible. Ces résultats mettent en évidence l'influence du cycle menstruel sur les capacités physiques lors des matchs de football féminin, ce qui peut moduler la performance globale. Par ailleurs, dans un contexte non compétitif, nous avons également constaté une amélioration de la performance lors de sprints sur de courtes distances (10 et 20 m) pendant la phase folliculaire tardive. Étant donné que la performance en football exige d'être rapide sur distances courtes, nos résultats tendent à suggérer un effet positif de cette phase sur la performance.

En tenant compte de l'ensemble de nos résultats dans la programmation des entraînements, il serait judicieux de proposer aux joueuses une approche individualisée en fonction de leur statut hormonal. Les exercices axés sur la vitesse de déplacement pourraient ainsi être particulièrement travaillés en phase folliculaire tardive, prédisposant ainsi les joueuses à des améliorations significatives de cette qualité.

Mots clés : football, cycle menstruel, hormones sexuelles, performance, vitesse.

Abstract

At the dawn of the 2023 FIFA Women's World Cup in Australia and New Zealand, women's football is experiencing steady growth both globally and locally in France. This intermittent sport is characterized by a combination of short, intense phases and variable recovery periods. Therefore, the physical performance of the players relies on their ability to be fast and recover effectively between each action. The menstrual cycle in women is marked by significant hormonal variations that lead to numerous physiological changes. In a sport like football, where the physical qualities of the players are crucial for performance, it is possible that the menstrual cycle may alter different physiological parameters. However, this topic remains relatively understudied due to the challenges of including high-level female players in research protocols.

During this thesis, we were able to demonstrate that the menstrual cycle influences the physical performance of female football players evaluated in real-life situations, such as competitions and training sessions. We observed a decrease in the distance covered at high intensity (between 14 and 21 km.h⁻¹) during the early follicular phase (menstruation) in matches. Similarly, during the late follicular phase, we found an increase in the number of sprints performed at speeds exceeding 21 km.h⁻¹, leading to a modification in the sprint pattern of the women during this phase. Thus, high-level female football players perform a greater number of shorter sprints when estrogen concentrations are high and progesterone concentrations are low. These results highlight the influence of the menstrual cycle on the physical abilities during women's football matches, which can impact overall performance. Additionally, in a non-competitive context, we also observed an improvement in performance during sprints over short distances (10 and 20 m) during the late follicular phase. Given that football performance requires speed over short distances, our results suggest a positive effect of this phase on performance.

Considering all of our findings in training programming, it would be advisable to offer women players an individualized approach based on their hormonal status. Exercises focused on speed could be particularly emphasized during the late follicular phase, predisposing high-level female football players to significant improvements in this quality.

Keywords: Football, menstrual cycle, sexual hormones, performance, speed.