



Evaluation des qualités neuromusculaires dans le football professionnel par l'utilisation des GPS : du profil force-vitesse horizontal vers l'accélération-vitesse in-situ

Pauline Clavel

► To cite this version:

Pauline Clavel. Evaluation des qualités neuromusculaires dans le football professionnel par l'utilisation des GPS : du profil force-vitesse horizontal vers l'accélération-vitesse in-situ. Physiologie [q-bio.TO]. Université Paris Cité, 2024. Français. NNT : 2024UNIP7026 . tel-04919446

HAL Id: tel-04919446

<https://theses.hal.science/tel-04919446v1>

Submitted on 29 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ PARIS CITÉ

École doctorale 566 : Sciences du Sport, de la Motricité et du Mouvement Humain

Laboratoire Sport, Expertise et Performance (EA7370) de l'INSEP

Evaluation des qualités neuromusculaires dans le football professionnel par l'utilisation des GPS : du profil force- vitesse horizontal vers l'accélération-vitesse *in-situ*

Par Pauline CLAVEL

Thèse de doctorat en Sciences du sport

Dirigée par Martin BUCHHEIT

Présentée et soutenue publiquement le 13 février 2024

Devant un jury composé de :

Laurent BOSQUET	PU, Université de Poitiers	Rapporteur
Nicolas PEYROT	PU, Le Mans Université	Rapporteur
Carole COMETTI	MCF, Université de Bourgogne	Examinatrice
Isabelle SIEGLER	PU, Université Paris Saclay	Présidente de jury, Examinatrice
Martin BUCHHEIT	MCF, INSEP	Directeur
Mathieu LACOME	PhD, INSEP	Co-encadrant

Avant-propos & remerciements

Les travaux de recherche présentés dans ce manuscrit ont été réalisés dans le cadre d' un contrat doctoral CIFRE (conventions industrielles de formation par la recherche) en collaboration avec le Paris Saint-Germain (PSG), l'Université Paris Cité et le laboratoire « Sport, Expertise et Performance » (SEP) de l'Institut National du Sport de l'Expertise et de la Performance (INSEP), d'octobre 2019 à septembre 2023.

D'octobre 2019 à août 2020, mes travaux de recherches ont porté sur l'individualisation des apports en glucides chez la footballeuse de haut-niveau. Cependant, pour différentes raisons j'ai dû changer de sujet de recherche. Cette excellente première expérience, a été marquée par la publication d'un article scientifique portant sur la validité et la reproductibilité d'un outil de surveillance de la glycémie en continu pendant l'activité intermittente est présentée en Annexe 1. Je tenais à remercier Eve Tiollier et Marina Fabre, nutritionnistes reconnues, pour leur gentillesse et leur accompagnement tant au niveau scientifique que personnel sur ce premier projet.

Je tenais à remercier chaleureusement Martin Buchheit, mon directeur de thèse, à l'initiative de ce projet.

Tout particulièrement un grand merci à Mathieu Lacomme pour son soutien perpétuel et pour m'avoir proposé un nouveau projet de recherche à la fin de l'été 2020, me permettant de poursuivre mon aventure de doctorante et de sport scientist au sein du PSG ! Merci Mathieu, pour ta disponibilité, ton accompagnement sur ces 4 ans et tes précieux conseils.

Je remercie infiniment Cédric Leduc pour son énorme investissement. Merci de m'avoir permis de me confronter à tes critiques toujours très constructive et permis de développer mes connaissances scientifiques et mes compétences en tant que chercheuse. Comme tu me l'as si bien dit d'un ton rieur « Maintenant tu sais écrire un papier ».

Merci à Jean-Benoît Morin pour m'avoir ouvert les portes de ses très nombreux concepts, pour les nombreux échanges de très grande qualité et ta grande disponibilité et réactivité.

Merci à Gaël Guilhem, directeur du laboratoire SEP, pour ta disponibilité et ton investissement de l'ombre.

Merci aux membres de mon comité de suivi individuel (CSI) de thèse, Pierre Samozino, Christopher Carling et Franck Brocherie, pour m'avoir accordé de votre temps si précieux ainsi que pour m'avoir écouté, conseillé et guidé.

Un très grand merci à Laurent Bosquet et Nicolas Peyrot, qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être les rapporteurs de cette thèse.

De la même manière, merci à Carole Cometti et Isabelle Siegler, qui me font l'honneur d'être examinatrices lors de ma soutenance de thèse.

Merci à tous mes collègues du Paris Saint-Germain que j'ai côtoyé ces 4 dernières années, tant du département performance que médical en passant par le staff technique et administratif.

Merci aux membres du laboratoire SEP, doctorants et chercheurs, qui malgré ma présence très limitée, m'ont toujours très bien accueillis et offerts de nombreux conseils.

Merci aux joueurs et joueuses ayant consenti à participer aux différentes études ainsi qu'aux staffs respectifs.

Enfin, ces simples mots suffiront à remercier infiniment mes très chers amis. Pour votre aide ou pour votre patience. Merci.

Pour terminer, je ne remercierai jamais assez ma famille, mes parents et mon frère d'avoir été d'un si grand soutien, non pas seulement lors de ces 4 dernières années mais depuis maintenant 30 ans. Merci de m'avoir poussé à aller au bout de ce projet. Merci pour votre amour.

Résumé

Evaluation des qualités neuromusculaires dans le football professionnel par l'utilisation des GPS : du profil force-vitesse horizontal vers l'accélération-vitesse in-situ

L'analyse de l'activité dans la pratique du football a montré, notamment par l'émergence des systèmes de positionnement par satellites (GPS), que le sprint est la principale action menant à des situations de buts et que les qualités neuromusculaires (vitesse, accélération) sont des facteurs clés pour la performance dans le football (Faude et coll., 2012 ; Haugen et coll., 2014). Une évaluation des qualités physiques en sprint de chaque joueur est primordiale pour déterminer leur potentiel et individualiser l'entraînement. Le profil force-vitesse (F-v) en sprint décrit précisément les relations entre la force et la vitesse ainsi qu'entre la puissance et la vitesse (Samozino et coll., 2016). Bien que la méthode soit simple, puisqu'elle ne requiert que la collecte des données à l'aide d'un radar ou laser lors d'un sprint maximal linéaire de 30 mètres, plusieurs problématiques subsistent dans le football professionnel. L'évaluation nécessite un effort maximal qui est difficilement reproductible au vu des calendriers très congestionnés. De plus, la collecte des données nécessite du matériel spécifique et le traitement des données peut devenir laborieux et chronophage pour l'évaluation régulière d'une équipe entière. Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse est d'évaluer si l'utilisation de l'outil GPS peut être une solution pour l'évaluation des qualités neuromusculaires dans le football professionnel. Dans une première étude, nous avons observé que le GPS est une alternative valide, reproductible et rapide par rapport au radar pour l'évaluation du profil F-v en sprint pour les joueurs élites. Dans une deuxième étude, nous avons analysé le nouveau concept de profil accélération-vitesse *in-situ* (A-S) dans le football (Morin et coll., 2021) et sa reproductibilité en fonction du nombre de séance incluses et de la présence de sprints standardisés. Nous avons observé que le profil A-S est un modèle reproductible pour déterminer la relation entre l'accélération et la vitesse à partir des données GPS récoltées à l'entraînement. Afin d'extrapoler des valeurs significatives et reproductibles, il est nécessaire de recueillir un nombre de points suffisants qui englobent des valeurs proches maximales (90 à 95 %) d'accélérations et de vitesse. Dans la troisième étude, nous avons examiné la validité du profil A-S par rapport au profil F-v et l'évolution des variables des deux profils pendant un cycle de développement de cinq semaines. Nous avons mis en évidence que les deux modèles reflètent mécaniquement le même concept et qu'ils peuvent être utilisés pour décrire les mêmes qualités. Cependant, les différences observées

rappellent que les méthodologies utilisées sont différentes et que les profils ne peuvent pas être utilisés de manière interchangeables. Néanmoins, la corrélation presque parfaite des évolutions des variables suggère que le profil A-S permet de suivre les qualités neuromusculaires de manière invisible. Ainsi une utilisation complémentaire des deux modèles semble judicieuse dans l'univers du football professionnel où les évaluations maximales sont difficiles à intégrer quotidiennement.

Mots clés : sport collectif, évaluation, membres inférieurs, qualités neuromusculaires, sprint

Abstract

Evaluation of neuromuscular qualities in professional football through the use of GPS: from the horizontal force-velocity profile to *in-situ* acceleration-speed.

The analysis of activity in football, particularly through the emergence of global positioning system (GPS) technologies, has shown that sprinting is the main action leading to goal situations and consequently neuromuscular qualities (speed, acceleration) are major components in football (Faude et al., 2012; Haugen et al., 2014). Evaluating the sprinting capabilities of each player is essential for individualizing training so that they can maximize their potential based on their strengths and weaknesses. The force-velocity (F-v) profile in sprinting precisely describes the relationships between force and velocity, as well as power and velocity (Samozino et al., 2016). Although the method is simple, as it only requires collecting radar or laser data during a 30-meter linear maximal, several issues arise in professional football. The evaluation requires a maximal effort that is difficult to plan due to congested schedules. Moreover, data collection requires specific equipment and data processing can be laborious and time-consuming for the regular evaluation of an entire team. Thus, the objective of this thesis is to evaluate if the use of GPS technology could be a solution to evaluate neuromuscular qualities in professional football. In a preliminary study, we observed that GPS is a valid, reliable, and fast alternative to radar for evaluating the F-v profile in sprinting for elite players. In a second study, we investigated the new concept of acceleration-speed (A-S) *in-situ* profile in football (Morin et al., 2021) and examined its reliability based on the number of included sessions and the presence of standardized sprints. We demonstrated that the A-S profile is a reliable model for evaluating the relationship between acceleration and speed using GPS data collected invisibly during training. However, an adequate number of data points encompassing sub-maximal (ideally at least 90 to 95%) speed and acceleration values is necessary to extrapolate reliable and meaningful values. In the third study, we studied the validity of the A-S profile against the F-v profile, and we evaluated the effect of a five-week resistance training protocol on the mechanical variables of F-v and A-S profiles. We demonstrated that both models share the same mechanical concept could be used to describe the same qualities. But the differences observed remind that methodologies are different and both profiles cannot be used interchangeably. However, significant correlations between the

evolution of variables in the F-v and A-S profiles suggest that the A-S profile could be considered a valid tool for monitoring neuromuscular qualities invisibly in football. Thus a complementary use of both models seems pertinent in the environment of professional football where maximum evaluations are difficult to integrate on a daily basis.

Key words : team sport, test, lower limbs, neuromuscular qualities, sprint

Liste des publications et communications

Publications dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture

Clavel, P., Tiollier, E., Leduc, C., Fabre, M., Lacome, M., & Buchheit, M. (2022). Concurrent Validity of a Continuous Glucose-Monitoring System at Rest and During and Following a High-Intensity Interval Training Session. *International journal of sports physiology and performance*, 17(4), 627–633. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2021-0222>

Clavel, P., Leduc, C., Morin, J. B., Owen, C., Samozino, P., Peeters, A., Buchheit, M., & Lacome, M. (2022). Concurrent Validity and Reliability of Sprinting Force-Velocity Profile Assessed With GPS Devices in Elite Athletes. *International journal of sports physiology and performance*, 17(10), 1527–1531. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2021-0339>

Clavel, P., Leduc, C., Morin, J. B., Buchheit, M., & Lacome, M. (2023). Reliability of individual acceleration-speed profile in-situ in elite youth soccer players. *Journal of biomechanics*, 153, 111602. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2023.111602>

Clavel, P., Leduc, C., Morin, J. B., Buchheit, M., & Lacome, M. (submission). Is it worth testing? A direct comparison between force-velocity profile and acceleration-speed profile *in-situ* in elite youth soccer players. *Science & medicine in football*.

Manifestations scientifiques

Clavel, P., (2022). Présentation de la thèse vulgarisée en 3 minutes (MT180). INSEP "Sport, data science & applications » le 15 décembre 2022.

Clavel, P., (2023). Présentation de la thèse dans le cadre de la conférence ANRT & FFF « La recherche en sport : considérer les datas, les technologies au service de l'apprentissage et la santé et le bien-être comme enjeux de performance » le 14 juin 2023.

Liste des principales abréviations

A_0 : accélération maximale théorique (m.s^{-2}) dérivant du profil accélération-vitesse *in-situ*

A-S : accélération-vitesse *in-situ*

AT : attaquant

AS_{pente} : pente du profil accélération-vitesse *in-situ*

CV : coefficient de variation

CI : intervalle de confiance

DC : défenseur central

DL : défenseur latéral

e.g. : exempli gratia (par exemple)

ES : taille d'effet

F_0 : force maximale théorique (N ou N.kg^{-1}) dérivant du profil force-vitesse

F-v : force-vitesse

FV_{pente} : pente du profil force-vitesse

GPS : système de positionnement par satellites

HI : haute intensité

HSR : course à haute intensité

i.e. : id est (c'est-à dire)

ICC : coefficient de corrélation intraclasse

MC : milieu central

ME : milieu excentré

P_{max} : puissance maximale théorique (W ou W.kg^{-1})

P-v : puissance-vitesse

S_0 : vitesse maximale théorique (m.s^{-1}) dérivant du profil A-S

SWC : plus petit changement détectable

TEE : erreur standard de l'estimation

V_0 : vitesse maximale théorique (m.s^{-1}) dérivant du profil F-v

V_{max} : vitesse maxime atteinte (m.s^{-1})

Liste des figures

- Figure 1 :** Évolution du nombre de publications scientifique pour l'activité football par an au cours depuis 1980. 24
- Figure 2 :** Relation hyperbolique entre la force et la vitesse obtenue sur un muscle Sartorius chez la grenouille (Hill, 1938). Les points blancs représentent les données expérimentales. La courbe noire représente la modélisation de la fonction inverse. 47
- Figure 3 :** Représentation schématique de la relation force-vitesse (ligne continue) et puissance-vitesse (ligne discontinue) d'un muscle isolé. La puissance maximale P_{max} est atteinte à une vitesse optimale V_{opt} (d'après Sargeant, 2007) 47
- Figure 4 :** Relations individuelles entre la vitesse et le couple de force (couple de freinage + couple cinétique) pendant la phase d'accélération des sprints sur un vélo ergomètre contre 19 N.m (points noirs) et 76 N.m (cercles vides) de couples de freinage chez deux sujets (d'après Seck et coll., 1994)..... 49
- Figure 5 :** A. Relations force-vitesse (carrés) et puissance-vitesse (rond) obtenues chez la femme (symbole vides) et chez l'homme (symbole remplis) lors de mouvements de demi-squats (d'après Bosco et coll., 2015) B. Relations force-vitesse et puissance-vitesse obtenues chez deux sujets lors d'un sprint de 100 m sur un tapis de course instrumenté. Les sujets 1 (cercles noirs, F-v ; gris, P-v) et 2 (cercles vides, F-v ; gris clairs, P-v) ont respectivement effectué le 100 m en 10,35 et 15,03 s (d'après Morin et coll., 2012) 50
- Figure 6 :** Évolution du profil force-vitesse (avant et après les 8 semaines d'entraînements comprenant deux séances par semaines) en fonction de la charge des chariots (respectivement une résistance qui réduit la vitesse de 0, 25, 50 et 75 %) chez des jeunes sportifs (d'après Cahill et coll., 2020)..... 58
- Figure 8 :** Une plate-forme de force mesure trois composantes du vecteur de force (F_x , F_y et F_z) et trois composantes du vecteur de moment de force (M_x , M_y et M_z). COM : centre de masse ; COP : centre de pression (Latash, 2012)..... 61
- Figure 9 :** Exemple d'un profil accélération-vitesse in-situ (A-S). Les points noirs sont les données brutes obtenues à partir de 8 séances d'entraînement de football. Les points gris sont les points utilisés pour construire le profil A-S linéaire (ligne en pointillé) à partir

duquel A_0 et S_0 sont extrapolées. A_0 : accélération maximale théorique ; S_0 : vitesse maximale théorique (issu de Morin et coll., 2021)	69
Figure 10 : Deux des unités GPS les plus utilisés actuellement dans le football professionnel (clubs et fédérations) avec une fréquence d'échantillonnage à 10 Hz et la double constellation (GPS + GNSS). A gauche, le Vector S7 de Catapult et à droite, le Apex Pro Series Pod de STATSport.	74
Figure 11 : Représentation schématique du traitement des données. Le panneau de gauche représente l'analyse de validité où le GPS a été comparé au radar, et celui de droite représente l'analyse de la reproductibilité interunités. Les deux partagent le même traitement des données via le script. Les figures a et b représentent l'identification du début et de la fin du sprint à partir du signal de vitesse brute. Le script identifie le début (i.e., la première valeur de vitesse $> 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ à partir de 0) et la fin du sprint (i.e., l'accélération négative après que le joueur ait atteint la vitesse maximale). Les figures c et d représentent l'ajustement des données de vitesse brute avec une équation mono-exponentielle à l'aide d'une méthode de régression des moindres carrés à partir de la fonction d'optimisation NLS de l'outil nlstools (version 3.6.2). Un délai (d) a été intégré dans l'équation initiale pour améliorer la qualité d'ajustement, si le départ effectif du sprint n'a pas eu lieu à $t=0\text{s}$ ($0,09 \pm 0,04 \text{ s}$ en moyenne dans la présente étude). Les figures e et f visaient à calculer les données de vitesse-temps, la force horizontale maximale théorique $F_0 [\text{N.kg}^{-1}]$, la puissance de sprint horizontale maximale $P_{\text{max}} [\text{W.kg}^{-1}]$ et la vitesse de sprint maximale théorique $V_0 [\text{m.s}^{-1}]$	86
Figure 12 : Analyses de Bland-Altman. La ligne noire représente le biais. Les lignes en pointillées représentent les limites (« limits of agreement ») à 90%.	89
Figure 13 : Représentation schématique de trois semaines du plan d'entraînement régulier conçu par le staff technique et performance. Chaque semaine était composée de 5 à 6 séances, incluant une séance de sprint spécifique (deux sprints de 30 m). Les séances étaient composées d'exercices techniques, physiques et tactiques (e.g., jeux réduits ou grand jeux). Les données GPS ont été collectées pour chaque séance.	98
Figure 14 : Méthodologie étape par étape pour construire un profil accélération-vitesse in-situ (A-S) à partir des données GPS d'une séance d'entraînement comprenant deux sprints de 30 m chez un joueur de football d'élite. A. Évolution temporelle de la vitesse brute (m.s^{-1}) fournie par le dispositif GPS. B. Évolution temporelle de la vitesse filtrée	

(m.s^{-1}) en noir et évolution temporelle de l'accélération (m.s^{-2}) en gris. La vitesse filtrée a été calculée à partir d'un filtre récursif et l'accélération a été déterminée comme le taux de variation de la vitesse filtrée. **C.** Nuage de points montrant la relation entre les données de vitesse filtrée (axe X) et les données d'accélération positive (axe Y). Les points en dessous du seuil de 3 m.s^{-1} ont été grisés pour plus de clarté. **D.** Nuage de points montrant la relation entre les données de vitesse filtrées et les données d'accélération positive (axe Y). Première régression linéaire (ligne noire) ajustée à partir des deux valeurs maximales (points gris) de l'accélération pour chaque sous-intervalle de 0,2 à partir de 3 m.s^{-1} à la vitesse maximale individuelle. **E.** Exemple d'un profil individuel A-S.. La ligne représente le profil linéaire à partir duquel l'accélération maximale théorique ($A_0 = 6,2 \text{ m.s}^{-2}$) et la vitesse maximale théorique ($S_0 = 9,5 \text{ m.s}^{-1}$) ont été déterminées. 101

Figure 15 : Exemple d'un profil individuel accélération-vitesse (A-S) in-situ obtenu à partir des données de différents nombres et contenus de séances chez un jeune joueur de football élite. La ligne représente le profil linéaire à partir duquel l'accélération maximale théorique (A_0) et la vitesse maximale théorique (S_0) ont été déterminées. Les points gris les plus larges sont les points utilisés pour construire la régression linéaire. Les points inférieurs au seuil de 3 m.s^{-1} ont été grisés pour plus de clarté. **A.** Profil individuel A-S in-situ sur la base d'une séance de sprint spécifique avec deux sprints de 30 m ($A_0 = 9,5 \text{ m.s}^{-2}$ et $S_0 = 6,2 \text{ m.s}^{-1}$). **B.** Profil individuel A-S in-situ basé sur une séance d'entraînement de football aléatoire sans exercice de sprint spécifiques ($A_0 = 8,2 \text{ m.s}^{-2}$ et $S_0 = 6,3 \text{ m.s}^{-1}$). **C.** Profil individuel A-S in-situ basé sur deux séances d'entraînement de football aléatoire sans exercice de sprint spécifiques ($A_0 = 7,9 \text{ m.s}^{-2}$ et $S_0 = 6,4 \text{ m.s}^{-1}$). **D.** Profil individuel A-S in-situ basé sur trois séances d'entraînement de football aléatoire sans exercice de sprint spécifiques ($A_0 = 7,2 \text{ m.s}^{-2}$ et $S_0 = 7,0 \text{ m.s}^{-1}$). **E.** Profil individuel A-S in-situ basé sur quatre séances d'entraînement de football aléatoire sans exercice de sprint spécifiques ($A_0 = 7,3 \text{ m.s}^{-2}$ et $S_0 = 7,0 \text{ m.s}^{-1}$). **F.** Profil individuel A-S in-situ basé sur cinq séances d'entraînement de football aléatoire comprenant une séance de sprint spécifique avec deux sprints de 30 m ($A_0 = 6,2 \text{ m.s}^{-2}$ et $S_0 = 9,3 \text{ m.s}^{-1}$). 102

Figure 16 : Exemple pour 4 séances sur une semaine de 5 séances : $54 = 5$ combinaisons. La première combinaison (Comb. 1) est utilisé pour construire le profil (A-S)₁ avec les séances 2, 3, 4 et 5. (Comb. 2) est utilisé pour construire le profil (A-S)₂ avec les séances

1, 3, 4 et 5. (Comb. 3 est utilisé pour construire le profil (A-S) ₃ avec les séances 1, 2, 4 et 5. (Comb. 4) est utilisé pour construire le profil (A-S) ₄ avec les sessions 1, 2, 3 et 5. (Comb. 5) est utilisé pour construire le profil (A-S) ₅ avec les sessions 1, 2, 3 et 4. (A – S) est la moyenne de ces 5 combinaisons.	103
Figure 17 : Représentation schématique des cinq semaines. Chaque semaine était composée de quatre séances d’entraînement terrain, d’un match (sauf la semaine 4), de deux séances endurance-force en salle (sauf la semaine 5) et d’une séance vitesse sur terrain incluant deux sprints de 30 mètres.....	120
Figure 18 : Graphique de Bland-Altman entre les variables du profil A-S et les variables du profil F-v, respectivement F_0 vs A_0 , V_0 vs S_0 et FV_{pente} vs AS_{pente} . Les lignes en tirets représentent les limites d'agrément.	126
Figure 19 : Corrélation entre le taux de variation des variables du profil F-v (F_0 , V_0 et FV_{pente}) et les variables du profil A-S (A_0 , S_0 et AS_{pente}) après les cinq semaines. F_0 , force maximale théorique (N.kg^{-1}) ; V_0 , vitesse maximale théorique (m.s^{-1}) ; A_0 , accélération maximale théorique (m.s^{-2}) ; S_0 , vitesse maximale théorique (m.s^{-1})	127
Figure 20 : Exemple d'un rapport généré pour l'évaluation du profil F-v du joueur A.....	133
Figure 21 : Processus pour l'évaluation des profil F-v à grande échelle avec les GPS. En blanc les étapes automatisées et en gris celles non automatisées.....	134
Figure 22 : Profil accélération-vitesse in-situ individuel du joueur A obtenu à partir des données GPS récoltées lors d'une semaine d'entraînement. A_0 = accélération maximale théorique, V_0 = vitesse maximale théorique, R^2 = coefficient de détermination	137
Figure 23 : Illustration schématique de l'utilisation de profil accélération-vitesse in-situ. Représentation de l'évolution de l'accélération maximale théorique (A_0) et de la vitesse maximale théorique (S_0) dérivées du profil A-S en continu sur 10 semaines sans intervention via les données GPS collectées à l'entraînement. La ligne avec les points correspond à S_0 , la ligne avec les tirets représente A_0 . La croix indique le moment de la blessure. La coche indique le moment de la reprise collective.	142

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principaux indicateurs utilisés par les systèmes de suivi du mouvement	26
Tableau 2 : Course à haute intensité (i.e., HSR > 19,8 km/h) en fonction de la possession de balle, de la période du match et du niveau des joueurs (international vs professionnel (d'après Bradley et coll., 2010)	31
Tableau 3 : Distance totale, à haute intensité, en sprint et vitesse maximal en fonction du statut du joueur (titulaire non remplacé, titulaire remplacé ou remplaçant) (d'après Bradley et coll., 2013).	32
Tableau 4 : Distance totale, à haute intensité, en sprint et nombre d'accélération (moyenne $\pm$ SD) dans le football professionnel en fonction du lieu (domicile vs extérieur) et du résultat (victoire vs défaite) du match ainsi que du poste (issu de Diez et coll., 2021)... ..	33
Tableau 5 : Statistiques descriptives (moyenne et écart-type) du nombre d'occurrence selon la distance effectuée en sprint (i.e., > 25,2 km.h ⁻¹) en fonction du poste et analyse ANOVA.	34
Tableau 6 : Nombre d'accélération et de décélération en match selon les zones d'intensité en fonction de la catégorie d'âge et du niveau dans le football féminin (Vescovi et coll., 2021).....	36
Tableau 7 : Distance parcourue en match selon les zones d'intensité en fonction de la catégorie d'âge et du niveau dans le football féminin (Vescovi et coll., 2021).....	36
Tableau 8 : Qualités physiques recommandées (basées sur les exigences physiques décrites en match) pour la performance chez les joueurs de football professionnel en fonction du poste.	43
Tableau 9 : Données descriptives (moyenne $\pm$ écart type) du profil force-vitesse en sprint et du temps de sprint affichés par sexe et par niveau de pratique (Jiménez-Reyes et coll., 2019).....	56
Tableau 10 : Corrélation entre les variables du profil force-vitesse en sprint et la performance en sprint (force (Haugen et coll., 2020).....	57
Tableau 11 : Profil force-vitesse horizontal recommandé associés aux qualités neuromusculaires pour la performance spécifique au poste chez les joueurs de football professionnel	60

Tableau 12 : Reproductibilité de la vitesse maximale sur les sprints de 5, 10, 15, 20 et 30 mètres (d'après Beato et De Keijzer, 2020).....	76
Tableau 13 : Analyse de la validité concurrente du GPS et de la reproductibilité interunités.	88
Tableau 14 : Principales variables caractérisant le profil A-S en fonction des combinaisons de séances.....	105
Tableau 15 : Reproductibilité des principales variables caractérisant le profil A-S en fonction des combinaisons du nombre de séances.	107
Tableau 16 : Analyse de la reproductibilité hebdomadaire des principales variables caractérisant le profil A-S.	108
Tableau 17 : Nombre de répétitions et charges ou hauteur associée du programme d'endurance-force en salle de musculation.	121
Tableau 18 : Analyse de la validité concurrente des principales variables mécaniques.	124
Tableau 19 : Taux de variation des variables des profils F-v et A-S avant et après les cinq semaines.	125

Table des matières

Avant-propos & remerciements	3
Résumé	5
Abstract	7
Liste des publications et communications.....	9
Liste des principales abréviations	10
Liste des figures	11
Liste des tableaux	15
Introduction générale.....	21
Revue de littérature	23
I. Analyse de l'activité physique en football	23
1. Le football : description de l'activité	23
2. Outils et variables utilisées	25
3. Les exigences physiques en match	27
4. Évolution des exigences au cours des dernières années	37
5. Qualités physiques associées à la performance en sprint.....	40
a) Force musculaire	40
b) Vitesse maximale	41
c) Puissance musculaire.....	42
6. Résumé.....	43
II. Le profil force-vitesse	45
1. Relation force-vitesse.....	45
a) Sur le muscle isolé.....	46
b) Mouvements mono-articulaires.....	48
c) Mouvements pluri-articulaires	49

2.	Profil force-vitesse horizontal	51
3.	Utilisation du profil force-vitesse horizontal	54
a)	Lien entre le profil force-vitesse horizontal et la performance	55
b)	Développement des qualités neuromusculaires.....	57
c)	Individualisation de l'entraînement.....	59
4.	Évaluation du profil force-vitesse horizontal : du laboratoire au terrain	60
a)	Plateforme de force	60
b)	Le transducteur de position linéaire	63
c)	Radar et laser	63
d)	Systèmes de portes de chronométrages	65
e)	Systèmes de caméras à grande vitesse	66
5.	Le profil accélération-vitesse <i>in-situ</i>	67
6.	Résumé.....	70
III.	Système de positionnement par satellites (GPS).....	71
1.	Naissance et fonctionnement du GPS	71
2.	Utilisation dans le football	72
3.	Evolution des GPS	73
4.	Validité et reproductibilité des GPS actuels	74
5.	Résumé.....	78
	Synthèse et problématiques	79
	Contributions personnelles	81
I.	Etude 1. Validité et reproductibilité du GPS pour l'évaluation du profil force-vitesse en sprint chez les athlètes élités	81
	Résumé	82
	Abstract	83
1.	Introduction.....	84
2.	Méthode	85

3. Résultats	87
4. Discussion	90
5. Applications pratiques	91
6. Conclusion	91
II. Etude 2. Reproductibilité du profil accélération-vitesse <i>in-situ</i> chez les jeunes footballeurs élites	93
Résumé	94
Abstract	95
1. Introduction.....	96
2. Méthode	97
3. Résultats.....	104
4. Discussion	108
5. Applications pratiques	114
6. Conclusion	114
III. Etude 3. Besoin de tester ? Comparaison entre le profil force-vitesse en sprint et le profil accélération-vitesse <i>in-situ</i> chez les jeunes footballeuses élites.....	115
Résumé	116
Abstract	117
1. Introduction.....	118
2. Méthode	120
3. Résultats.....	123
4. Discussion	128
5. Applications pratiques	130
6. Conclusion	130
Discussion générale.....	131
Applications pratiques.....	141
Bibliographie	143

Annexes	171
Annexe 1 - Validité concurrente du système de mesure du glucose en continu (CGM) au repos, pendant et après une activité intermittente à haute intensité	171
Annexe 2 - Validité et reproductibilité du GPS pour l'évaluation du profil force-vitesse en sprint chez les athlètes élités	179
Annexe 3. Reproductibilité du profil accélération-vitesse <i>in-situ</i> chez les jeunes footballeurs élités	185
Annexe 4 - Besoin de tester ? Comparaison entre le profil force-vitesse en sprint et le profil accélération-vitesse <i>in-situ</i> chez les jeunes footballeuses élités.....	195

Introduction générale

Le football est un sport d'équipe physiquement exigeant, caractérisé par une activité intermittente avec des périodes à haute intensité (e.g., accélérations, décélérations, changements de direction, sprints) entrecoupées de phases de récupération (active et passive) (Stolen et coll., 2005 ; Reynolds et coll., 2021). Au cours des dernières années, l'intensité dans le football professionnel masculin a significativement augmenté, notamment les courses à haute intensité (+ 29%) et en sprint (+ 50%) (Reynolds et coll., 2021 ; Barnes et coll., 2014 ; Lago-Peñas et coll., 2022). Parallèlement, dans le football féminin les courses à haute intensité ont augmenté de 16% à 32% en fonction du poste, entre la coupe du Monde 2015 et 2019 (FIFA, 2019). L'analyse de l'activité en football a montré, notamment par l'émergence du système de positionnement par satellites (GPS), que 83 % des buts sont précédés d'une action explosive, dont le sprint linéaire est la principale action (45 %) et ainsi que les qualités neuromusculaires (force, puissance, vitesse) sont clés pour la performance dans le football moderne (Faude et coll. 2012 ; Haugen et coll. 2014).

L'évolution de l'intensité des matchs implique une préparation adéquate afin que les joueurs puissent faire face aux exigences physiques. Afin d'optimiser cette préparation, il est primordial d'avoir une connaissance fine des qualités des joueurs. Ainsi, l'évaluation des qualités neuromusculaires en sprint est importante. En effet, derrière l'apparente similitude entre deux performances identiques sur un sprint peut se cacher des qualités neuromusculaires bien différentes. L'évaluation des qualités neuromusculaires en sprint de chaque joueur est primordiale pour individualiser l'entraînement afin que celui-ci optimise son potentiel en fonction de ses forces et ses faiblesses. Bien qu'il existe plusieurs méthodologies, le niveau de validité, de reproductibilité, le coût financier et humain ou encore la facilité de réalisation sont des critères primordiaux à prendre en compte pour le choix de la méthode d'évaluation (Haugen et Buchheit, 2016). Aujourd'hui, la méthode la plus utilisée en football pour évaluer et ainsi caractériser les propriétés mécaniques des membres inférieures en sprint est le profil Force-vitesse (F-v) horizontal (Samozino et coll., 2016). Cette méthode décrit précisément les relations entre la force et la vitesse ainsi qu'entre la puissance et la vitesse et permet d'extrapoler la force maximale théorique horizontale (F_0), la vitesse maximale théorique (V_0) et la puissance

maximale ($P_{\max}$). A noter que dans l'ensemble du manuscrit, sauf exception dite, nous considérons le profil F-v comme le profil F-v en sprint (i.e., profil F-v horizontal).

Bien que cette méthode soit simple puisqu'elle ne requiert que la collecte des données à l'aide de différents outils (e.g., laser, vidéo, etc.) (Bezodis et coll., 2012 ; Chelly et coll., 2009) lors d'un sprint maximal linéaire d'au moins 30 mètres, plusieurs problématiques résident dans le football professionnel. Une des problématiques principales concerne l'évaluation en elle-même, qui par définition nécessite un effort maximal standardisé de la part des joueurs. En effet au vu des calendriers très congestionnés et de la faible adhésion des entraîneurs, la mise en place d'évaluations maximales telles que la planification d'un à deux sprints est devenue problématique dans le football professionnel moderne (Carling et coll., 2018 ; Julian et coll., 2021). De plus, la récolte de données n'est pas toujours possible puisqu'elle nécessite soit du matériel spécifique et coûteux (e.g., radar ou laser), soit une mise en place précise qui doit être standardisée (e.g., vidéo, application smartphone). Enfin le traitement des données est rapide pour une évaluation ponctuelle d'un joueur mais il peut très vite devenir laborieux et chronophage quand il s'agit d'une évaluation régulière d'une équipe de football entière comptant souvent plus de 30 joueurs. C'est pour cela qu'une nouvelle méthode, modélisée par le profil accélération-vitesse *in-situ* (A-S), a été développée en 2021 (Morin et coll., 2021). Bien qu'inspirée par le profil F-v, cette méthode ne nécessite pas l'exécution standardisée d'un sprint, et grâce à l'évolution de la technologies GPS, permet de récolter des données dans un contexte écologique à l'entraînement ou en match sans matériel supplémentaire. Le profil A-S permet de construire une relation linéaire entre l'accélération et la vitesse de manière à extrapoler les qualités de vitesse et d'accélération maximale théoriques pendant. Ce concept novateur nécessite cependant à ce jour d'être validé et les besoins pour établir un profil reproductible définis.

Ce manuscrit sera décomposé en trois parties principales. En premier lieu, une revue de littérature permettra de présenter une description de l'activité football, les qualités neuromusculaires associés à la performance pour enfin établir les méthodologies d'évaluation des qualités neuromusculaires. La revue de littérature sera synthétisée et mettra en avant les problématiques principales et les objectifs associées au projet de thèse. La deuxième partie présentera les trois études originales réalisées en fonction des objectifs préalablement définis. Enfin, dans une troisième partie, le manuscrit sera clôturé par une discussion générale.

I. Analyse de l'activité physique en football

1. Le football : description de l'activité

Le football est le sport le plus populaire au monde avec environ 130 000 joueurs de football professionnels en 2019 (FIFA, 2019), 270 millions joueurs amateurs et plus de 5 milliards de fan (FIFA, 2021). Cette popularité s'explique par des règles simples, un jeu rapide et un résultat imprédictible. Par définition, « le football est un sport dans lequel deux équipes de onze joueurs chacune cherchent à envoyer dans le but adverse un ballon sphérique, avec les pieds, la tête ou toute autre partie du corps (exceptée la main ou le bras) » (Dictionnaire Larousse, 2022).

Un match officiel dure deux mi-temps de 45 minutes, espacées d'une pause de 15 minutes et se déroule sur un terrain en herbe de dimensions de 100-110 mètres de long et 65-75 mètres de large. L'équipe gagnante est celle qui marque un but de plus que l'adversaire. La performance collective dans le football peut être défini comme l'interaction de différents aspects techniques, tactiques (Carling et coll., 2009), physiques (Drust et coll., 2007) et psychologiques (Lochbaum et coll., 2022).

Le football est un sport intermittent, incluant une répétition de déplacements brefs et variés (avant, latéral, arrière, en courbe, saut, changement de direction, etc.) à allures de courses variables dans un environnement dynamique et imprévisible (Bangsbo, 2014 ; Sarmiento et coll., 2014). La réalisation de ces tâches explosives à répétition tout le long d'un match implique une sollicitation physiologique de différents systèmes, c'est-à-dire (i.e.) nécessitant une demande forte des filières aérobie et anaérobie (Dolci et coll., 2018). Plusieurs études ont mis en avant le fait que les joueurs faisant partis des équipes les plus performantes montraient des qualités physiques supérieures, notamment des capacités physiologiques et neuromusculaires spécifiques (Cometti et coll., 2001 ; Haugen et coll., 2013 ; Tønnessen et coll., 2013). En particulier, les performances concernant les courses à haute intensité et en sprint ainsi que la

capacité d'accélération et de vitesse maximale (Cometti et coll., 2001 ; Haugen et coll., 2013). De ce fait, bien que traditionnellement considéré comme un sport reposant sur une dominante aérobie, les qualités de force et de vitesse progressent considérablement alors que le niveau aérobie plafonne ou diminue légèrement (Haugen et coll., 2013 ; Tønnessen et coll., 2013). En effet, les actions à haute intensité, que ce soient les courses en sprint (proche de la vitesse maximale), ou les accélérations, se produisent pendant les moments les plus déterminants en compétition (récupération de balle, course dans l'espace, action de but, etc.) (Barnes et coll., 2014 ; Di Salvo et coll., 2009 ; Faude et coll., 2012 ; Delaney et coll., 2017).

L'émergence des nouvelles technologies, notamment les outils de suivi de mouvement ont permis de collecter de plus en plus de données à l'entraînement et en match. A partir des données récoltées, une démultiplication des analyses qualitatives et quantitatives ont permis de caractériser précisément les exigences physiques pendant un match de football de manière à optimiser l'entraînement (Akenhead et Nassis, 2016). Ce phénomène est marqué par une augmentation exponentielle du nombre d'articles scientifiques publié depuis le début des années 2000 (**Figure 1**).

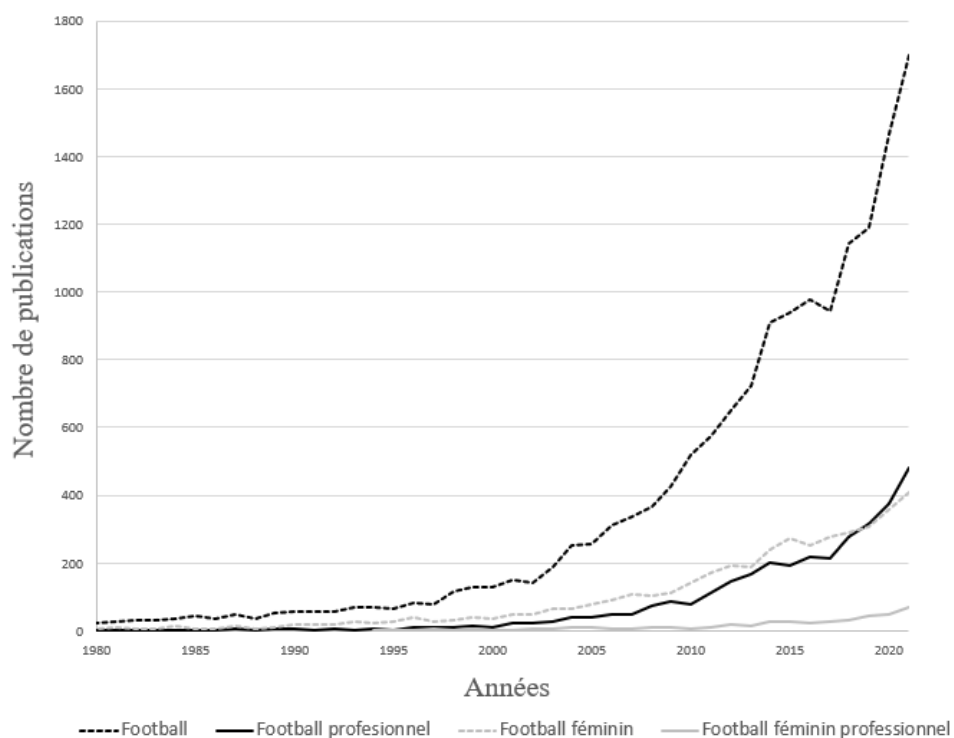


Figure 1 : Évolution du nombre de publications scientifique pour l'activité football par an au cours depuis 1980.

L'objectif fondamental de l'analyse de l'activité football est de mieux décrire et comprendre l'activité spécifique football pour améliorer les méthodes d'entraînement de manière à prévenir les blessures et optimiser les performances en compétition. Pour cela, les outils de tracking sont indispensables et ont subi une forte évolution permettant l'accessibilité à un public très large et offrant de nombreuses métriques (Goto et coll., 2013).

2. Outils et variables utilisées

Aujourd'hui les deux principaux outils permettant de caractériser l'activité football sont le système de suivi par vidéo et le système de positionnement par satellites (GPS). Les clubs de football professionnels combinent ces deux solutions, qui peuvent être utilisées de manière interchangeable (Pons and coll., 2021). Le suivi vidéo est principalement utilisé lors des grandes compétitions officielles alors que les GPS sont utilisés lors des entraînements. Cela s'explique du fait que les clubs utilisaient le système de suivi vidéo en compétition étant donné que jusqu'en 2015 les GPS étaient bannis en compétition officielle. Cependant, les GPS sont aussi fortement utilisés en compétition pour les équipes n'ayant pas accès au système de suivi par vidéo (matchs amicaux, jeunes, féminines, divisions inférieures, etc.). En effet uniquement les grandes ligues de football professionnels ont signé des accords commerciaux avec des entreprises spécialisées dans les systèmes de suivi par vidéo (e.g., Amisco, Prozone, etc.). La validité et reproductibilité de ces méthodes ont été largement démontrées, tant pour les systèmes par vidéo (Bradley et coll., 2007, 2009 ; Di Salvo et coll., 2006, 2009) que pour les GPS (Chapitre 1, III).

Les variables fournies par les deux solutions sont nombreuses et peuvent varier en fonction du système, de la marque, de la version ou de l'objectif. Les principales métriques sont décrites dans le **Tableau 1** et regroupées en 3 catégories : i) tout d'abord les variables relatives à la distance parcourue (distance totale parcourue, distance parcourue selon l'intensité définie par des zones de vitesse), ensuite ii) les variables relatives à la vitesse (vitesse moyenne et vitesse maximale) et enfin iii) les variables relatives aux accélérations et décélérations (nombre d'accélération selon l'intensité, nombre de décélérations selon l'intensité, accélération maximale, décélération maximale).

L'activité football a été principalement étudié à l'aide des métriques relatives à la distance parcourue, telles que la distance totale et la distance en fonction de zones de vitesse (Bradley et

coll., 2009 ; Di Salvo et coll., 2010) précédemment définies pour classer l'intensité des déplacements (Bangsbo et coll., 1991).

Tableau 1 : Principaux indicateurs utilisés par les systèmes de suivi du mouvement

Variable	Unité	Définition
Distance totale	m	Distance totale parcourue déterminée à partir de ses positions occupées sur le terrain.
Distance à faible intensité	m	Distance totale parcourue dans une zone de vitesse faible (e.g., entre 7,2 et à 14,3 km.h ⁻¹).
Distance à intensité modérée	m	Distance totale parcourue dans une zone de vitesse faible (e.g., entre 14,4 et 19,7 km.h ⁻¹).
Distance à haute-intensité	m	Distance totale parcourue dans une zone de vitesse élevée (e.g., entre 19,8 et à 25,1 km.h ⁻¹).
Distance en sprint	m	Distance totale parcourue dans une zone de vitesse très élevée (e.g., supérieure à 25,1 km.h ⁻¹).
Vitesse moyenne	m.min ⁻¹	Vitesse moyenne exprimée par minute
Vitesse maximale	km.h ⁻¹	Vitesse maximale atteinte
Nombre d'accélération à haute intensité	/	Nombre d'accélération supérieure à 3 m.s ⁻²
Nombre de décélération à haute intensité	/	Nombre de décélération supérieure à 3 m.s ⁻² (i.e, nombre d'accélération inférieure à - 3 m.s ⁻²)
Accélération maximale	m.s ⁻²	Accélération maximale atteinte
Décélération maximale	m.s ⁻²	Décélération maximale atteinte

Cependant les exigences physiques ne peuvent pas être uniquement caractérisées par des métriques relatives à la distance parcourue. En effet, celles-ci ne décrivent qu'une partie des exigences auxquelles les joueurs sont soumis étant donné les changements fréquents de vitesse. Les changements positifs (accélération) et négatifs (décélération) de vitesse imposent des exigences supplémentaires au corps par rapport au déplacement à une vitesse constante (Osgnach et coll., 2010). Ces changements de vitesse peuvent être brefs (e.g., inférieure à 1 s) et ne pas répondre aux exigences de vitesse (e.g., $< 19,8 \text{ km.h}^{-1}$) de manière à être qualifié d'activités de course à haute intensité. Néanmoins, elles caractérisent des actions à haute intensité (Akenhead et coll., 2013 ; Mara et coll., 2016 ; Nakamura et coll., 2017) qui nécessitent d'être pris en compte. Par conséquent, les métriques tenant en compte de la quantité et de l'intensité des accélérations et des décélérations sont utilisées pour décrire les exigences des matchs de football (Bradley et coll., 2011, 2018 ; Barros et coll., 2007 ; Di Salvo et coll., 2007, 2009 ; Rampinini et coll., 2007, 2009 ; Torreño et coll., 2016) . Une récente revue de littérature (Miguel et coll., 2021) montre que les métriques peuvent être utilisées avec des aspects qualitatifs (e.g., nombre d'entrée en sprint), quantitatifs (e.g., accélération maximale), temporels (e.g., temps passé en sprint) et relatifs (e.g., par minute) pour décrire plus précisément les actions à haute-intensité. Par exemple les demandes associées entre un joueur qui parcourt 50 mètres en sprint en une seule course sont différentes d'un joueur qui parcourt 50 mètres en sprint en dix courses. Dans le premier cas, la qualité de vitesse est prédominante, alors que dans le second cas il s'agit de la qualité d'accélération.

3. Les exigences physiques en match

De nombreuses études ont observé que les joueurs professionnels parcouraient une distance totale entre 9 et 13 km et réalisaient entre 60 et 100 accélérations ($> 2 \text{ m.s}^{-2}$) par match (Mohr et coll., 2003 ; Bangsbo et coll., 2002 ; Rampini et coll., 2007 ; Bradley et coll., 2010 ; Barnes et coll., 2014 ; Dalen et coll., 2016 ; Lorenzo-Martínez et coll., 2021). Une majeure partie de ces déplacements ($\sim 75 \%$) sont effectués à faible intensité (i.e., $< 15 \text{ km.h}^{-1}$) et une partie mineure à haute intensité (~ 8 à 12% , incluant 1 à 4% en sprint) (Sarmiento et coll., 2014), ce qui représente entre 600 et 1200 mètres par match. Ces chiffres sous-estiment inévitablement la survenue de mouvements effectués à faible vitesse et varient en fonction des seuils de vitesse utilisés (accélération, changement de direction, saut, etc.) (Castagna et coll., 2017).

Les actions à haute intensité (HI) telles que les courses à haute intensité (i.e., à haute vitesse), les sprints ou les accélérations sont les actions les plus importantes en match. En effet, la capacité à effectuer des actions à HI s'est avérée être un facteur clé de la performance étant donné que les moments clés d'un match se jouent sur ces périodes (récupération de balle, passe décisive, but, dépassement de joueurs, etc.) que ce soit dans le football masculin (Faude et coll., 2012 ; Krustup et coll., 2003 ; Mohr et coll., 2003 ; Oliva-Lozano et coll., 2020) ou féminin (Martínez-Hernández et coll., 2023).

La performance étant contextuelle, la variabilité des exigences physiques décrites ci-dessus dépend fortement du contexte du match observé. La période de la saison (Bradley et coll., 2011 ; Mohr et coll., 2003 ; Rampinini et coll., 2007a ; Tierney et coll., 2016), les conditions météorologiques (Mohr et coll., 2012 ; Ohashi, 1987), le type de pelouse (Andersson et coll., 2008a) ou le niveau de l'adversaire (Rampinini et coll., 2007a) sont autant de paramètres qu'il convient de ne pas négliger. De plus, des facteurs internes au match tels que le système de jeu (Bradley et coll., 2011 ; Clemente et coll., 2013 ; Tierney et coll., 2016), la période du match (Mohr et coll., 2003, 2005 ; Reilly et coll., 2008 ; Bradley et coll., 2010, 2013), la répartition de la possession de balle ou encore le statut du joueur (remplaçant vs titulaire) (Bradley et coll., 2010 ; Carling et coll., 2010 ; Hills et coll., 2019 ; Padrón-Cabo et coll., 2018 ; Lorenzo-Martínez et coll., 2021) impactent les exigences.

A titre d'exemple, le **Tableau 2** met en avant les différences concernant la distance parcourue à haute intensité (HSR) en fonction du niveau du joueur (international vs professionnel), de la possession du ballon et de la période du match par tranche de 15 minutes et par mi-temps (Bradley et coll., 2010). Tout d'abord il y a peu de différences significatives entre des joueurs internationaux et professionnels. En revanche, une plus faible HSR est parcourue avec la possession par rapport à sans la possession du ballon (respectivement 428 ± 267 vs 542 ± 214 m sur 90 minutes). De plus, une différence significative de la HSR est notée entre les périodes 0 – 15, 15 – 30, 45 – 60, 60 – 75 minutes de jeu par rapport aux 15 dernières minutes du match (respectivement 160 ± 67 , 160 ± 65 , 162 ± 66 , 152 ± 60 vs 177 ± 72 m en 15 minutes, $p < 0.05$). Ces résultats pourraient s'expliquer par le fait que les joueurs ayant un statut de remplaçant ont une activité significativement plus importante que les joueurs titulaires. En effet comme deuxième exemple de la variabilité des exigences physiques, le **Tableau 3** décrit les différences observées sur plusieurs indicateurs en fonction du statut du joueur (respectivement remplaçant, titulaire, titulaire remplacé) (Bradley et coll., 2013). Les résultats montrent une différence

significative que ce soit concernant la vitesse moyenne (respectivement $120,1 \pm 14,5$ vs $112,3 \pm 10,3$ ou $116,2 \pm 10,6$ m.min⁻¹, $p < 0,05$), la vitesse moyenne à haute intensité (respectivement $9,1 \pm 3,6$ vs $7,1 \pm 2,3$ et $8,2 \pm 2,3$ m.min⁻¹, $p < 0,05$) ou la vitesse moyenne en sprint (respectivement $3,4 \pm 2,3$ vs $2,6 \pm 1,3$ et $3,0 \pm 1,3$ m.min⁻¹, $p < 0,05$). A contrario, la vitesse maximale est plus faible pour les joueurs remplaçants par rapport aux titulaires ($30,9 \pm 2,16$ vs $32,4 \pm 1,08$ km.⁻¹, $p < 0,05$). Cela peut s'expliquer de deux façons : soit le joueur titulaire a des qualités physiques supérieures, soit il a plus d'opportunité d'atteindre sa vitesse maximale pendant le match, du fait de son temps de jeu plus élevé.

Enfin en dernier exemple le **Tableau 4** présente la distance totale parcourue, la distance à haute intensité (i.e., HSR > 19,8 km.h⁻¹), la distance en sprint (i.e., SPR > 25 km.h⁻¹) et le nombre d'accélération en fonction du lieu du match (domicile vs extérieur), du résultat du match (victoire vs défaite) ainsi que du poste chez des joueurs de football professionnels de deuxième division espagnol (Diez et coll., 2021).

Ces résultats permettent d'observer i) que les demandes physiques varient légèrement en fonction d'un match à domicile ou à l'extérieur et du résultat du match (la plus grande distance totale parcourue lors des matchs à domicile et perdus, et la plus grande distance en sprint pour des matchs à domicile et gagnés), ii) que les demandes physiques diffèrent considérablement en fonction du poste. Les défenseurs centraux effectuent le moins de distance totale (de 10124 ± 480 à 10645 ± 713 m) tandis que les milieux de terrain en parcourent le plus (de 11355 ± 861 à 11987 ± 722 m). Les attaquants et les défenseurs latéraux font le plus de distance à haute intensité et en sprint (respectivement 777 et 735 m en HSR, et 227 m et 165 m en SPR) alors que les milieux de terrain en effectuent le moins (655 m en HSR et 101 m en SPR). Les milieux effectuent le plus d'accélération à intensité moyenne (entre 2 et 4 m.s⁻²), mais le moins à haute intensité (> 4 m.s⁻²) avec respectivement 169 et 13 accélérations. Les attaquants et les défenseurs latéraux sont les postes effectuant le plus d'accélérations à haute intensité (> 4 m.s⁻²) avec respectivement 19 et 18 accélérations en moyenne. Plusieurs études corroborent ces résultats, avec notamment des précisions supplémentaires qui différencient les postes de milieux centraux (MC) et les milieux excentrés (ME). En effet certes les premières études ont majoritairement découpé les postes en trois catégories : les défenseurs, les milieux et les attaquants (AT) (Bloomfield et coll., 2007 ; Rampinini et coll., 2007a ; Vigne et coll., 2010) mais avec l'évolution du jeu et dans le but de décrire plus spécifiquement les demandes physiques, les défenseurs sont subdivisés en défenseurs centraux (DC) et défenseurs latéraux

(DL) et les milieux sont subdivisés en milieux centraux (MC) et milieux excentrés (ME) (Barros et coll., 2007; Di Salvo et coll., 2007, 2009, 2010). Le poste de gardien de but, très spécifique, est majoritairement exclu des analyses, ou étudié de façon indépendante.

Plusieurs études démontrent que les milieux effectuent le plus de distance pendant un match (environ 11500 m), alors que les DC le moins (entre 10000 et 10500 m) (Bradley et coll., 2010 ; Schuth et coll., 2016 ; Diez et coll., 2021). Le pourcentage de HSR par rapport à la distance totale varie significativement en fonction du poste ($p < 0,001$) (Di Salvo et coll., 2010 ; Carling et coll., 2012 ; Dalen et coll., 2016 ; Baptista et coll., 2018). Les valeurs les plus élevées ont été observées chez les excentrés (DL et ME) et les plus faibles chez les DC (DL : $8,6 \pm 1,2$ % ; ME : $8,3 \pm 2,2$ % ; AT : $7,3 \pm 1,6$ % ; MC : $6,2 \pm 1,3$ % ; DC : $5,1 \pm 1,4$ % ; ES = de 0,8 à 2,7) (Carling et coll., 2012).

En valeur absolu, l'étude de Dalen et coll., 2016 est en accord avec les résultats ci-avant (Carling et coll., 2013) : les DL effectuent le plus de distance à haute intensité ($HSR > 19,8$ km. h^{-1}) et en sprint ($SPR > 25,2$ km. h^{-1}) et les DC le moins (respectivement 1138 ± 282 et 330 ± 133 , 1095 ± 255 et 276 ± 111 , 776 ± 264 et 198 ± 93 , 770 ± 270 et 152 ± 80 ainsi que 484 ± 134 et 110 ± 55 m pour les DL, ME, AT, MC et les DC). Plus récemment selon l'étude de Baptista et coll. (2018) ce sont les AT qui effectuent le plus de distance à haute intensité (HSR entre 19,8 et 25,2 km. h^{-1}) et en sprint ($SPR > 25,2$ km. h^{-1}), suivi des postes excentrés et toujours les DC le moins (respectivement 846 ± 144 et 225 ± 90 m, 828 ± 162 et 153 ± 63 m, 729 ± 153 et 180 ± 54 m, 720 ± 315 et 126 ± 90 m ainsi que 468 ± 144 et 81 ± 45 m pour les AT, ME, DL, MC et les DC).

Tableau 2 : Course à haute intensité (i.e., HSR > 19,8 km/h) en fonction de la possession de balle, de la période du match et du niveau des joueurs (international vs professionnel (d'après Bradley et coll., 2010))

		Période du match (min)									
		0-15	15-30	30-45	45-60	60-75	75-90	MT1	MT2	0-90	
HSR avec possession (m)	International	58 ± 37	59 ± 43	72 ± 67	63 ± 53	53 ± 32	79 ± 59	189 ± 123	± 195 ± 135	± 384 ± 260	±
	Professionnel	74 ± 52	76 ± 60	73 ± 59	71 ± 55	65 ± 51 ‡	74 ± 57	223 ± 145	± 210 ± 136 §	± 433 ± 268	±
	Combiné	72 ± 51	74 ± 59	73 ± 60	70 ± 55	64 ± 50 ‡	74 ± 57	220 ± 143	± 209 ± 135 §	± 428 ± 267	±
HSR sans possession (m)	International	79 ± 36	84 ± 53	94 ± 59	89 ± 32	66 ± 20 ‡	109 ± 37	± 257 ± 101	± 264 ± 74	± 551 ± 155	±
	Professionnel	88 ± 50 #	84 ± 34 #	91 ± 52	92 ± 50	90 ± 51 #	101 ± 51	± 261 ± 123	± 283 ± 119	± 544 ± 219	±
	Combiné	86 ± 49 #	84 ± 51 #	91 ± 52	92 ± 48	88 ± 50 #	102 ± 49	± 261 ± 120	± 281 ± 115	± 542 ± 214	±
HSR (m)	International	136 ± 59 #	± 143 ± 48	± 166 ± 56	± 153 ± 46	± 119 ± 29 ¶#	± 187 ± 58	± 445 ± 139	± 459 ± 110	± 904 ± 230	±
	Professionnel	160 ± 68 #	± 160 ± 67 #	± 165 ± 76	± 163 ± 68 #	± 155 ± 60 #	± 175 ± 73	± 484 ± 171	± 493 ± 159	± 977 ± 301	±
	Combiné	160 ± 67 #	± 160 ± 65 #	± 169 ± 73	± 162 ± 66 #	± 152 ± 60 #	± 177 ± 72	± 489 ± 163	± 490 ± 156	± 980 ± 294	±

‡ : différence significative par rapport aux autres 15 min ($p < 0,05$) ; # : différence significative par rapport à 75-90 ($p < 0,05$) ; § : différence significative par rapport à 0-45 ($p < 0,05$) ; ¶ différence significative des joueurs internationaux ($p < 0,05$) ; HSD = distance parcourue à haute-intensité (> 19,8 km/h) ; MT1 = première mi-temps ; MT2 = deuxième mi-temps, p = p-value

Tableau 3 : Distance totale, à haute intensité, en sprint et vitesse maximal en fonction du statut du joueur (titulaire non remplacé, titulaire remplacé ou remplaçant) (d'après Bradley et coll., 2013).

	Match entier (n = 810)	Titulaire remplacé (n = 286)	Remplaçant (n = 286)
Distance totale (m.min ⁻¹)	112,3 ± 10,3 *	116,2 ± 10,6 #	120,1 ± 14,5
Distance > 19,8 km.h ⁻¹ (m.min ⁻¹)	7,1 ± 2,3 *	8,2 ± 2,3 #	9,1 ± 3,6
Distance > 25 km.h ⁻¹ (m.min ⁻¹)	2,6 ± 1,3 #+	3,0 ± 1,3 ‡	3,4 ± 2,3
Vitesse maximale (km.h ⁻¹)	32,4 ± 1,08 #	32,04 ± 1,08 #	30,96 ± 2,16

* : différence significative par rapport à joueur remplacé et remplaçant ($p < 0,01$) ; + : différence significative par rapport joueur remplacé ($p < 0,05$) ; ‡ : différence significative par rapport joueur remplaçant ($p < 0,05$) ; # différence significative par rapport joueur remplaçant ($p < 0,01$) ; p, p-value ; n, effectif

Dans les compétitions UEFA, les postes qui effectuent en nombre le plus de sprints sont spécifiquement les ME ($35,8 \pm 13,4$), suivi par les AT ($30,0 \pm 12,0$) et DL ($29,5 \pm 11,7$) puis les MC ($23,5 \pm 12,2$) et enfin les DC ($17,3 \pm 8,7$) (Di Salvo et coll., 2010). Le classement est le même concernant le nombre d'accélération : ME ($76,7 \pm 12,1$), suivi des AT ($71,7 \pm 12$), suivi des DL ($71,2 \pm 11,6$), suivi des MC ($65,8 \pm 15,6$) et enfin les DC ($64,9 \pm 9,7$). En revanche pour la distance parcourue en accélération, les AT passent devant les ME avec 459 ± 117 m vs 432 ± 81 m, puis l'ordre reste inchangé avec les DL, MC et DC avec 396 ± 54 , 333 ± 108 et enfin 333 ± 63 m (Baptista et coll., 2018).

Le **Tableau 5** et les résultats précédents permettent d'observer des patterns sur les courses à HI et en sprint différents en fonction du poste. Pour tous les postes, la distance parcourue à HI (i.e., HSR entre 19,8 et 25,2 km.h⁻¹) est principalement sur une distance entre 1 et 5 mètres, sauf pour les DL entre 6 et 10 mètres. Pour tous les postes, la distance parcourue en sprint (i.e., SPR > 25,2 km .h⁻¹) est aussi principalement sur une distance 1 et 5 mètres, sauf pour les AT entre 6 et 10 mètres. Ainsi les positions centrales (DC et MC) effectuent un peu moins de courses à HI et en sprint, mais surtout sur des distances plus courtes, alors que les positions excentrées font beaucoup de courses à HI et plutôt longues, et enfin l'attaquant effectuent beaucoup de sprint et plutôt long.

Tableau 4 : Distance totale, à haute intensité, en sprint et nombre d'accélération (moyenne $\pm$ SD) dans le football professionnel en fonction du lieu (domicile vs extérieur) et du résultat (victoire vs défaite) du match ainsi que du poste (issu de Diez et coll., 2021).

		Domicile		Extérieur	
		Victoire	Défaite	Victoire	Défaite
Défenseurs centraux	TD (m)	10311 $\pm$ 276	10645 $\pm$ 713	10262 $\pm$ 664	10124 $\pm$ 480
	HSR (m)	431 $\pm$ 97	402 $\pm$ 175	353 $\pm$ 83	387 $\pm$ 113
	SPR (m)	71 $\pm$ 35	53 $\pm$ 40	54 $\pm$ 11	73 $\pm$ 45
	Acc Z1 (n)	151 $\pm$ 33	174 $\pm$ 63	136 $\pm$ 68	158 $\pm$ 29
	Acc Z2 (n)	11 $\pm$ 5	15 $\pm$ 10	13 $\pm$ 7	13 $\pm$ 8
Défenseurs latéraux	TD (m)	10820 $\pm$ 206	10851 $\pm$ 997	10784 $\pm$ 603	10686 $\pm$ 498
	HSR (m)	766 $\pm$ 123	742 $\pm$ 452	662 $\pm$ 123	770 $\pm$ 210
	SPR (m)	193 $\pm$ 87	189 $\pm$ 179	106 $\pm$ 44	174 $\pm$ 74
	Acc Z1 (n)	173 $\pm$ 17	186 $\pm$ 24	144 $\pm$ 67	160 $\pm$ 36
	Acc Z2 (n)	19 $\pm$ 8	20 $\pm$ 5	20 $\pm$ 6	16 $\pm$ 10
Milieux	TD (m)	11987 $\pm$ 722	11735 $\pm$ 607	11647 $\pm$ 641	11355 $\pm$ 861
	HSR (m)	732 $\pm$ 272	596 $\pm$ 144	673 $\pm$ 214	620 $\pm$ 202
	SPR (m)	136 $\pm$ 85	63 $\pm$ 46	112 $\pm$ 68	94 $\pm$ 54
	Acc Z1 (n)	166 $\pm$ 41	185 $\pm$ 25	163 $\pm$ 65	163 $\pm$ 38
	Acc Z2 (n)	12 $\pm$ 6	11 $\pm$ 4	16 $\pm$ 5	13 $\pm$ 7
Attaquants	TD (m)	10827 $\pm$ 715	11032 $\pm$ 320	11049 $\pm$ 669	11056 $\pm$ 733
	HSR (m)	808 $\pm$ 231	681 $\pm$ 142	850 $\pm$ 120	769 $\pm$ 283
	SPR (m)	233 $\pm$ 101	144 $\pm$ 72	266 $\pm$ 92	266 $\pm$ 201
	Acc Z1 (n)	146 $\pm$ 24	170 $\pm$ 11	168 $\pm$ 30	150 $\pm$ 34
	Acc Z2 (n)	20 $\pm$ 8	22 $\pm$ 2	19 $\pm$ 10	15 $\pm$ 9

TD : distance totale; HSR : distance $> 19,8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$; SPR: distance $> 25 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$; Acc Z1: nombre d'accélération entre $2\text{-}4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; Acc Z2 : nombre d'accélération $> 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

Tableau 5 : Statistiques descriptives (moyenne et écart-type) du nombre d'occurrence selon la distance effectuée en sprint (i.e., $> 25,2 \text{ km.h}^{-1}$) en fonction du poste et analyse ANOVA.

Distance en sprint	DC	DL	MC	ME	AT	p	Comparaison multiple Taille d'effet
1 – 5 m	1,9 (1,2)	3,0 (1,7)	2,3 (1,9)	4,2 (1,7)	3,4 (1,6)	< 0,001	DC < ME (0,42) ; MC < ME (0,35)
6 – 10 m	1,9 (1,5)	2,9 (1,2)	2,2 (1,8)	3,1 (1,6)	3,6 (2,5)	0,007	DC < AT (0,23)
11 – 15 m	1,0 (1,0)	2,2 (1,5)	1,5 (1,5)	1,8 (1,1)	2,3 (1,7)	0,008	DC < DL (0,29)
16 – 20 m	0,7 (0,7)	1,6 (1,2)	1,3 (1,5)	1,3 (0,9)	2,6 (1,6)	< 0,001	DC < DL (0,25) ; DC < AT (0,40) ; MC < AT (0,28) ; ME < AT (0,26)
21 – 25 m	0,4 (0,6)	1,1 (0,9)	0,9 (1,1)	1,0 (0,9)	1,5 (1,1)	0,001	DC < DL (0,29) ; DC < AT (0,33)
26 – 30 m	0,3 (0,5)	0,7 (0,7)	0,5 (0,6)	0,5 (0,6)	0,4 (0,5)	0,087	Pas de différences significatives
31 – 35 m	0,1 (0,3)	0,5 (0,6)	0,3 (0,6)	0,4 (0,7)	1,1 (0,8)	< 0,001	DC < AT (0,42) ; DL < AT (0,26) ; MC < AT (0,34) ; ME < AT (0,25)
36 – 40 m	0,0 (1,7)	0,3 (0,5)	0,2 (0,4)	0,0 (0,0)	0,5 (0,7)	0,001	DC < DL (0,24) ; DC < AT (0,27) ; ME < AT (0,26)
> 41 m	0,3 (0,5)	0,4 (0,8)	0,2 (0,5)	0,4 (0,6)	0,2 (0,4)	0,436	Pas de différences significatives

DC : défenseur central ; DL : défenseur latéral ; MC : milieu central ; ME : milieu excentré, AT : attaquant.

La majorité des études s'est intéressée au public masculin. En effet, la démocratisation du football féminin est très récente avec notamment la première Coupe du Monde jouée en 1991 (Williams et coll., 2011, 2015). Depuis cette date, il a été observé un développement mondial et exponentiel du football féminin, tant par sa pratique que par les institutions qui la gèrent (Malina et coll., 2021, Martínez-Lagunas et coll., 2014). Ce développement a été accompagné

d'une augmentation des audiences, ce qui a conduit à la création de ligues et de clubs professionnels, générant ainsi une plus grande professionnalisation (Harkness-Armstrong et coll., 2021). L'intérêt scientifique pour le football féminin n'est pas resté en marge de cette réalité et les analyses des exigences physiques ont été un nouvel axe de recherche de manière à approfondir les connaissances sur le football féminin (Andersson et coll., 2010 ; Datson et coll., 2017 ; Griffin et coll., 2021 ; Hewitt et coll., 2014). En effet, les capacités physiologiques entre les sexes sont différentes, que ce soient les capacités aérobies ou les capacités de sprints (Mujika et coll., 2009). Cependant, comme le public masculin, les résultats entre les différents systèmes ne sont pas interchangeables (Buchheit et Simpson, 2017) et bien que des seuils de vitesse et d'accélérations inférieurs aient été suggérés pour athlètes féminines, il n'existe actuellement aucun consensus (Dwyer et Gabbett, 2012 ; Bradley et Vescovi 2015 ; Park et coll., 2019), ce qui implique de comparer les études avec précaution.

Les joueuses de football professionnelles parcourent entre 9 et 11 km par match (Bradley & Scott., 2020 ; Hewitt et coll., 2014 ; Ramos et coll., 2019 ; Scott et coll., 2020 ; Datson et coll., 2017). Tout comme le public masculin, les DC effectuent la plus petite distance totale alors que les MC la plus grande distance (Martínez-Lagunas & Scott, 2016 ; Bradley & Scott., 2020). Par ailleurs, les ME parcourent le plus de distance à haute intensité (HSR entre 19 et 23 km.h⁻¹ et SPR > 23 km.h⁻¹) et les DC le moins (respectivement 445 ± 113 et 136 ± 76 m, 405 ± 126 et 115 ± 70 m, 317 ± 100 et 82 ± 52 m, 326 ± 156 et 61 ± 62 m ainsi que 215 ± 71 et 45 ± 31 m ainsi que pour les ME, AT, DL, CM et les DC). Enfin, des études ont mis en avant que les qualités de vitesse étaient spécifiques aux postes et que les joueuses les plus rapides sont les AT et les plus lentes les MC (e.g., respectivement 31 ± 1,9, 30,8 ± 2,8, 30,6 ± 2,2, 30,3 ± 1,4 et 29,8 ± 1,6 km.h⁻¹ pour les AT, ME, DL, DC et MC ; Scott et coll., 2020).

Les résultats d'une étude complète sur le football féminin (Vescovi et coll., 2021) sont présentés dans le **Tableau 6**. Cette étude a conclu que la distance totale était très proche entre le niveau professionnel (10332 m) et internationale (10144 m) mais que celle-ci augmentait avec les catégories d'âge (respectivement 86, 94 et 97 et 100 m.min⁻¹ entre U15, U16, U17 et NCAA). Cette étude a mis en avant que les accélérations et les distances parcourues à HI augmentaient avec les catégories d'âge mais aussi le niveau (164 vs 151 et 1251 m vs 1113 m respectivement entre le niveau international et professionnel).

Tableau 6 : Nombre d'accélération et de décélération en match selon les zones d'intensité en fonction de la catégorie d'âge et du niveau dans le football féminin (Vescovi et coll., 2021).

	Durée (min)	Acc Zone 1 (n)	Acc Zone 2 (n)	Acc Zone 3 (n)	Acc Totale (n)	Dec Zone 1 (n)	Dec Zone 2 (n)	Dec Zone 3 (n)	Dec Totale (n)
U15	80 (2)	98 (19)	2 (2)	0	101 (20)	103 (17)	9 (6)	1 (1)	113 (18)
U16	84 (1)	109 (33)	3 (2)	0	112 (34)	112 (21)	12 (5)	1 (2)	125 (26)
U17	90 (0)	109 (31)	2 (2)	0	112 (31)	114 (24)	13 (6)	1 (1)	129 (29)
NCAA	97 (4)	144 (29)	5 (3)	0	149 (31)	141 (32)	20 (8)	2 (2)	163 (38)
PRO	94 (2)	145 (26)	5 (3)	0	151 (27)	144 (28)	21 (8)	2 (2)	167 (32)
INT	91 (2)	158 (23)	6 (4)	0	164 (25)	146 (22)	23 (8)	3 (2)	172 (27)

Zone 1 = $1,8 - 3,6 \text{ m.s}^{-2}$; Zone 2 = $3,6 - 5,4 \text{ m.s}^{-2}$; Zone 3 = $5,4 - 7,2 \text{ m.s}^{-2}$

Tableau 7 : Distance parcourue en match selon les zones d'intensité en fonction de la catégorie d'âge et du niveau dans le football féminin (Vescovi et coll., 2021).

	Durée (min)	Dist. Zone 1 (m)	Dist. Zone 2 (m)	Dist. Zone 3 (m)	Dist. Zone 4 (m)	Dist. Zone 5 (m)	Dist. Zone 6 (m)	Dist. Z5 + Z6	Distance totale (m)	Distance relative (m.min ⁻¹)
U15	80 (2)	2597 (368)	838 (193)	1996 (395)	958 (226)	465 (111)	79 (61)	545 (141)	6936 (335)	87 (4)
U16	84 (1)	2957 (358)	896 (179)	2168 (469)	1211 (365)	562 (179)	150 (115)	713 (206)	7946 (869)	94 (11)
U17	90 (0)	3124 (328)	1031 (162)	2461 (610)	1306 (456)	609 (163)	213 (174)	823 (281)	8746 (928)	97 (10)
NCAA	97 (4)	3178 (279)	1251 (185)	2898 (487)	1455 (307)	744 (205)	237 (121)	981 (309)	9762 (774)	101 (8)
PRO	94 (2)	3363 (369)	1276 (258)	2851 (484)	1728 (471)	752 (184)	361 (191)	1113 (288)	10332 (877)	109 (9)
INT	91 (2)	2846 (247)	1242 (114)	2977 (308)	1827 (318)	837 (172)	414 (170)	1251 (276)	10144 (546)	111 (6)

Acc = Accélération; Dec = Décélération ; Zone 1 = $< 6 \text{ km.h}^{-1}$; Zone 2 = $6 - 8 \text{ km.h}^{-1}$; Zone 3 = $8 - 12 \text{ km.h}^{-1}$; Zone 4 = $12 - 16 \text{ km.h}^{-1}$; Zone 5 = $16 - 20 \text{ km.h}^{-1}$; Zone 6 = $> 20 \text{ km.h}^{-1}$; Z5 = Zone 5 ; Z6 = Zone 6

4. Évolution des exigences au cours des dernières années

La conjonction de plusieurs facteurs tels que la modification des règles du jeu (e.g., le hors-jeu en 1990, la passe en retrait au gardien en 1992, les 3 points de victoire en 1995 ou encore les 5 changements depuis 2020), les nouveaux choix tactiques, l'utilisation des nouvelles technologies, la professionnalisation du sport, les transferts internationaux, ou l'amélioration de la préparation physique des joueurs a provoqué des changements significatifs dans la manière de jouer (Bush et coll., 2016, Wallace et coll., 2014).

La comparaison des finales de Coupe du Monde entre 1966 et 2010 a montré que la manière de jouer avait fortement changé au cours du temps et que cela était marqué par un changement significatif de la majorité des indicateurs évalués dans l'étude de Wallace et Norton (2014). Par définition le temps de jeu effectif, également appelé temps de jeu réel, dans le contexte du football, fait référence à la durée réelle pendant laquelle le ballon est en jeu et le jeu est actif. Contrairement à la durée totale d'un match, le temps de jeu effectif exclut les arrêts de jeu tels que les remplacements, les blessures, les fautes, les sorties de ballon, etc. Etant donné que le temps de jeu effectif n'a pas évolué ($p = 0,145$) mais que le temps d'arrêt de jeu a augmenté ($p < 0,05$), le pourcentage de temps de jeu effectif a fortement diminué de 64,2 % à 53,6 %. Le temps d'une action moyenne a diminué de 4 secondes (de 29 à 25 secondes, $p < 0,05$) et le temps d'arrêt d'une action a augmenté de 7 secondes (10 à 17 secondes, $p < 0,001$). Ainsi le ratio de récupération (temps de jeu : temps de récupération) est passée de 4:1 en 1966 à 1.5:1 en 2010. Par exemple il a été observé une augmentation de plus de 8 secondes pour effectuer un dégagement du gardien (16 à 24 secondes, $p < 0,01$), plus de 7 secondes pour un corner (19 à 26 secondes, $p < 0,01$), plus de 4 secondes pour une touche (8 à 12 secondes, $p < 0,01$) ou plus de 7 secondes pour un coup franc (13 à 20 secondes, $p < 0,01$). Cependant, pendant les phases de jeu, l'intensité est fortement supérieure, avec une augmentation de la vitesse moyenne sur tout le temps du match du ballon de 8,0 à 9,2 m.s^{-1} ($p < 0,05$) en 44 ans, soit une augmentation significative de plus de 15 % et une augmentation du taux de passe de 11,3 à 15,3 passes par minute ($p < 0,01$) soit une augmentation significative de plus de 35 % en 44 ans. Enfin, une analyse de la position des joueurs a montré que la structure du jeu a évolué vers une plus grande densité de joueurs ($p < 0,01$). Par conséquent, ces changements impliquent une évolution dans les exigences physiques du football moderne : les joueurs doivent être plus rapides (jeu plus intense), plus forts (plus de densité) et plus intermittent à haute intensité.

Plusieurs études ont mis en évidence la forte évolution des exigences physiques relatives aux actions à haute intensité dans le football professionnel moderne (Barnes et coll., 2014 ; Bush et coll., 2015, 2017 ; Bradley et coll., 2016 ; Zhou et coll., 2020 ; Radziminski et Jastrzebski, 2021 ; Lago-Peñas, et coll., 2023 ; Bradley et Scott, 2020).

Une étude longitudinale de 7 saisons a décrit l'évolution des exigences physiques dans le championnat de première division Anglaise (EPL) entre 2006-07 et 2012-13 (Barnes et coll., 2014). La distance totale parcourue lors d'un match était légèrement inférieure (+ 1,9 %) en 2006-07 par rapport à 2012-2013 ($10\,679 \pm 956$ contre $10\,881 \pm 885$ m ; $p < 0,001$; Taille d'effet (ES) : 0,01 à 0,22). Les courses à haute intensité (i.e., HSR entre 19,8 et 25 km.h⁻¹) ont significativement augmenté (+ 29 %), tant en distance (de 890 ± 299 m en 2006-07 à $1\,151 \pm 337$ m en 2012-13 ; $p < 0,001$; ES : 0,82), qu'en nombre d'actions (+ 49 %) (118 ± 36 contre 176 ± 46 ; $p < 0,001$; ES : 1,41). Dans le même sens, les courses en sprint (i.e., > 25 km.h⁻¹) ont significativement augmenté (+ 50 %), tant en distance (232 ± 114 à 350 ± 139 m entre 2006-07 et 2012-13 ; $p < 0,001$; ES : 0,93), qu'en nombre de sprint (+ 83 %) (31 ± 14 vs 57 ± 20 ; $p < 0,001$; ES : 1,46). En pourcentage, le nombre de sprint explosif a aussi augmenté (34 ± 11 vs 47 ± 9 %, $p < 0,001$; ES : 1,31). A contrario, la distance moyenne par sprint a diminué ($6,9 \pm 1,3$ vs $5,9 \pm 0,8$ m, $p < 0,001$; ES : 0,91). Enfin, la vitesse maximale atteinte a augmenté de 5 % en passant de $9,12 \pm 0,43$ en 2006-07 à $9,55 \pm 0,40$ m.s⁻¹ en 2012-13 ($p < 0,001$; ES : 1,02).

Peu après, une deuxième étude sur ces 7 années d'EPL a identifié ces tendances évolutives comme étant particulières aux postes (Bush et coll., 2015). Tous les postes ont eu une augmentation significative des actions effectuées à haute intensité, avec une magnitude modérée (axiaux) à très large (latéraux). Les DL ont eu la plus grande évolution (+ 35%) concernant la distance parcourue à haute intensité ($p < 0,001$; ES : 1,3), suivi par les DC (+ 33 % ; $p < 0,05$; ES : 1,1), les MC (+ 30% ; $p < 0,05$; ES : 1,1), les ME (+ 27 % ; $p < 0,05$; ES : 1,0) et enfin les AT (+24 % ; $p < 0,05$; ES : 0,9). Le nombre de courses à haute intensité a augmenté pour tous les postes (ES : 0,8 – 1,3). Concernant la distance parcourue en sprint, ce sont à nouveaux les DL qui ont eu la plus forte augmentation (62 % , ES : 1,3), suivi par les ME, (53 % , ES : 1,3), les DC et MC (53 % , ES : 1,1) et enfin les AT (36 % , ES : 0,8). Le nombre de sprint a augmenté pour toutes les positions (ES : 1,6 – 2,0). Les sprints dits explosif ont eu une très large évolution ($p < 0,001$) pour tous les postes (DC : 7 ± 5 vs 19 ± 8 , ES : 1,8 ; DL : 11 ± 6 vs 28 ± 10 , ES : 2,1 ; MC: 11 ± 7 vs 29 ± 10 , ES : 2,0 ; ME : 14 ± 7 vs 33 ± 1 , ES : 2,1 ; AT : 12 ± 6 vs 27 ± 9 , ES : 2,0). Les sprints dits progressifs ont eu une évolution modérée

à large ($p < 0,001$ sauf $p < 0,01$ pour les attaquants) pour tous les postes (DC : 13 ± 5 vs 20 ± 7 , ES : 1,2 ; DL : 22 ± 8 vs 35 ± 10 , ES : 1,4 ; MC : 20 ± 9 vs 30 ± 10 , ES : 1,1 ; ME : 27 ± 9 vs 41 ± 11 , ES : 1,4 ; AT : 23 ± 9 vs 32 ± 11 , ES : 0,9).

Enfin, une troisième étude sur ces 7 années d'EPL s'est intéressée à l'évolution en fonction du classement du championnat (Bush et coll., 2015). Les rangs A, B, C et D comprennent les équipes terminant respectivement de 1 à 4^{ème}, 5 à 8^{ème}, 9 à 14^{ème} et 15 à 20^{ème}. Les résultats ont mis en avant que peu importe le rang, toutes les équipes ont augmenté leurs performances physiques (e.g., augmentation des courses à haute intensité des rangs B, A, C et D de respectivement 37 %, 33 %, 32 % et 23 %). La tendance est similaire pour les sprints explosifs.

Deux études longitudinales de 5 saisons sur la Super League Chinoise (CSL) entre 2012 et 2017 (Zhou et coll., 2020) et de 4 saisons sur le championnat Ekstraklasa Polonais (EP) entre 2017-18 et 2020-21 ont montré des évolutions similaires à celles de la EPL. La distance totale reste plutôt stable au fil du temps, alors que les distances de course à haute intensité et en sprint ont considérablement évolué. Pour la CSL, la distance parcourue ainsi que le nombre de courses haute intensité (i.e., $> 19.1 \text{ km.h}^{-1}$) ont respectivement augmenté de 9,9 % et 9,2 % entre 2012 et 2017 ($2568 \pm 504 \text{ m}$ vs $2823 \pm 479 \text{ m}$, $p < 0,001$; ES : 0,40 et 187 ± 36 vs 205 ± 34 , $p < 0,001$; ES : 0,49). Dans la même tendance, la distance parcourue en sprint ainsi que le nombre sprint (i.e., $> 23 \text{ km.h}^{-1}$) ont respectivement augmenté de 9,8 % et 4,7 % entre 2012 et 2017 ($2070 \pm 509 \text{ m}$ vs $2272 \pm 494 \text{ m}$, $p < 0,001$; ES : 0,40 et 100 ± 23 vs 105 ± 21 , $p < 0,001$; ES : 0,22). Pour l'EP, la distance à haute intensité a augmenté de 11,9 % ($p < 0,001$), la distance en sprint a augmenté de 7,7 % (1689 ± 363 vs 1820 ± 363 , $p < 0,01$) et le nombre d'actions à HI de 9,7 % ($p < 0,01$) (Radziminski et Jastrzebski, 2021).

Tout récemment, une étude longitudinale de 8 saisons sur le championnat Espagnol (LLE) entre 2012-13 et 2019-20 (Lago-Peñas et coll., 2022) a décrit une légère diminution de 3,3 % concernant la distance totale parcourue (10547 ± 965 vs $10206 \pm 867 \text{ m}$; $p < 0,001$; ES : 0,37). Tout comme les études précédentes, elle a observé une augmentation de la distance parcourue à HI (i.e., $> 21 \text{ km.h}^{-1}$) (523 ± 225 vs $555 \pm 223 \text{ m}$; $p < 0,001$; ES : 0,14) et du nombre d'action à HI ($29,9 \pm 10,7$ vs $33,3 \pm 11,4$; $p < 0,01$; ES : 0,30) respectivement de l'ordre de 8 à 9,5 % et 9,2 à 14,6 % en fonction des postes. Les postes excentrés ont les exigences et les évolutions les plus élevées par rapport aux actions à HI (+ 14,6 % pour les DL ; + 9,2 % pour les ME ; + 8,2 % pour les DC ; + 9,5 % pour les MC ; + 8,0 % pour les AT) entre 2012-13 et 2019-20.

Par ailleurs, une étude de la FIFA (Bradley et Scott, 2020) s'est intéressée à l'évolution des exigences physiques chez les joueuses professionnelles internationales en comparant les performances entre la Coupe du Monde 2015 et 2019. Cette étude est en adéquation avec les observations chez les joueurs professionnels que ce soit collectivement ou spécifiquement aux postes. Cette étude a mis en avant un fort accroissement des courses à haute intensité (i.e., $> 19 \text{ km.h}^{-1}$) (4211 vs 4957 m), des courses en sprint (i.e., $> 23 \text{ km.h}^{-1}$) (1356 vs 1808 m) et du nombre d'action en sprint (80 vs 99) entre 2015 et 2019. La plus forte évolution concerne les ME avec 26.6 % (467 vs 591 m), puis les MC avec 20,4% (382 vs 460 m), DC avec 19 % (292 vs 349 m), les AT avec 13,3% (468 vs 530 m) et enfin les DL avec 11,6 % (449 vs 501 m). Les tendances sont encore plus élevées pour les courses en sprint avec 74,4 % pour les ME (173 vs 255 m), avec 35,2 % pour les DC (91 vs 123m), 30,0 % pour les DL (157 vs 204 m), avec 26,4 % pour les AT (174 vs. 220 m) et avec 19,4 % pour les MC (93 vs 111 m).

Ces résultats mettent en avant le besoin de s'intéresser plus spécifiquement aux qualités physiques associées à la performance en sprint, i.e., aux qualités neuromusculaires, d'autant plus qu'une récente étude a estimé une poursuite de l'accroissement de l'intensité de l'ordre de 7 % entre 2020 et 2030 (Nassis et coll., 2021).

5. Qualités physiques associées à la performance en sprint

Les qualités neuromusculaires associées à la performance des actions à haute intensité (e.g., accélération brève, sprint à vitesse maximal) sont les qualités de force, de vitesse et de puissance des membres inférieurs.

a) Force musculaire

La première grandeur mécanique qui est la force peut être défini comme l'action mécanique permettant de générer une accélération et donc un mouvement au corps ou à l'objet considéré. La force (F) est exprimée en Newton (N). Elle peut être externe (force gravitationnelle, résistance du milieu ambiant, aérien ou liquide) ou interne (action des muscles, force élastique stockée au sein du tendon). Par ailleurs un rappel des lois énoncées par Isaac Newton (Newton, 1687) permet l'analyse et la compréhension des mouvements mono-articulaires (e.g., extension du genou), des mouvements multi-articulaires (e.g., squat) et même des mouvements plus complexes impliquant tous les segments corporels (e.g., changement de direction, sprint).

Newton décrit par l'intermédiaire des lois, les mouvements humains au travers des forces appliquées au corps ou à l'objet considéré.

La première loi de Newton, ou principe d'inertie, est la suivante « tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui et ne le contraigne à changer d'état ». Par exemple, au début d'un sprint, le passage d'une position statique à la mise en action se fait grâce à une force produite par les membres inférieurs sur le sol (ou les starting blocks). La deuxième loi de Newton, ou principe fondamental de la dynamique, est la suivante : « l'altération du mouvement est proportionnelle à la force qui lui est imprimée ; et cette altération se fait en ligne droite dans la direction de la force ». Par exemple, si un joueur améliore la force de ses membres inférieurs grâce à l'entraînement tout en conservant la même masse corporelle, alors il aura une plus grande capacité à accélérer son corps lors d'un sprint. La troisième loi de Newton, ou principe d'action-réaction, est la suivante : « pour chaque action, il existe une réaction égale et opposée : l'action est toujours égale à la réaction ; c'est-à-dire que les actions de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales, et dans des directions contraires ». Par exemple, la force générée par les membres inférieurs d'un joueur qui « pousse » contre le sol entraîne des forces de réaction au sol dans lesquelles le sol « repousse » et permet au coureur de se déplacer.

La définition du centre de gravité, ou centre de masse, est aussi primordiale lors de mouvements explosifs puisqu'il permet de comprendre l'équilibre et la stabilité et en plus affecte les techniques sportives. Il s'agit d'un point imaginaire autour duquel le poids corporel est uniformément réparti. Le centre de gravité du corps humain peut changer considérablement en fonction des individus en fonction de la taille et masse des segments (Hall, 2007, 2019).

La qualité de force est primordiale étant donné qu'elle permet de générer une accélération. De manière plus précise, la force verticale est nécessaire pour réaliser les mouvements de sauts tant que la force horizontale est primordiale pour les mouvements de sprints, qu'ils soient brefs (i.e., accélération à haute intensité nécessitant un haut niveau de force à faible vitesse) ou plus longs (capacité à exercer de la force à vitesse élevée).

b) Vitesse maximale

La deuxième grandeur mécanique est la vitesse du mouvement. Elle correspond au déplacement par rapport au temps nécessaire pour couvrir une distance. D'un point de vue mathématiques, la vitesse est la dérivée de la distance par rapport au temps (Equation 1). La vitesse (v) est

exprimée en mètres par secondes ($m.s^{-1}$). La vitesse permet par ailleurs de retrouver mathématiquement, les valeurs d'accélération provoquée par l'application des forces sur cette même période (Equation 2). L'application d'une force au sol en course à pied permet au coureur d'accélérer son centre de masse et de parcourir une distance en un temps donné. Lors d'un sprint, la qualité de vitesse correspond à la capacité à exercer de la force à des vitesses élevées pour atteindre une haute vitesse.

$$v (m.s^{-1}) = \frac{\Delta d (m)}{\Delta t (s)} \quad (1)$$

$$a (m.s^{-2}) = \frac{\Delta v (m.s^{-1})}{\Delta t (s)} \quad (2)$$

La qualité de vitesse maximale est primordiale dans l'activité football étant donné i) qu'elle caractérise le niveau de performance (Reilly et coll., 2000 ; Cometti et coll., 2001) et ii) que près d'un but sur deux est précédé (45 %) d'un sprint linéaire (Faude et coll., 2012).

c) Puissance musculaire

La troisième grandeur mécanique, souvent celle qui est la plus associée à la performance de mouvements explosifs tel que le sprint est la puissance. D'un point de vue des sciences physiques, la puissance (P) est par définition la quantité d'énergie par unité de temps (Equation 3). L'énergie qui elle-même mesure la capacité d'un système à modifier un état notamment en fournissant un travail pour créer un mouvement (Equation 4). Ainsi, la puissance peut aussi être défini comme le produit de la force par la vitesse du mouvement (Equation 5).

$$P (W) = \frac{W (J)}{\Delta t (s)} \quad (3)$$

$$W (J) = F (N) * \Delta d (m) \quad (4)$$

$$P (W) = \frac{F (N) * \Delta d (m)}{\Delta t (s)} = F(N) * v (m.s^{-1}) \quad (5)$$

L'étude des relations entre la force et la vitesse permet donc d'estimer les qualités de puissance du système considéré et d'expliquer une part de la performance sportive. La tendance actuelle

en préparation physique est de mesurer la puissance maximale à l'aide d'évaluations physiques (e.g., le profil force-vitesse).

6. Résumé

Bien que faiblement représentées (entre 8 et 12 %), i) les actions à haute intensité sont les plus importantes et discriminantes dans le football moderne, ii) sont très spécifiques au poste et iii) sont en forte augmentation ces dernières années. En effet la majorité des situations de buts sont associées à des mouvements explosifs (accélérations brèves, sprint explosif) ou des courses en sprint. De plus, l'évolution de l'activité football (réglementaire, professionnalisme, tactique, etc.) a engendré une plus forte intensité marquée par une très forte augmentation des actions à haute intensité (plus de 50 %). La capacité à produire de la force à faible et haute vitesse permet au joueur d'accélérer sur tout le spectre de vitesse et d'atteindre une vitesse maximale élevée.

Historiquement, les évaluations physiques se sont principalement concentrées sur les qualités d'endurance. Puis avec l'évolution du football, de nouvelles évaluations ont été développées notamment en salle (e.g., 1RM) mais peu spécifiques au sprint. Aujourd'hui, le football moderne nécessite une évaluation des qualités neuromusculaires en sprint accessible sur le terrain, plus précise et spécifique à l'activité. Au vu des exigences spécifiques au poste, le suivi individualisé des qualités de force, de puissance et de vitesse est un enjeu majeur dans le football professionnel (**Tableau 8**).

Tableau 8 : *Qualités physiques recommandées (basées sur les exigences physiques décrites en match) pour la performance chez les joueurs de football professionnel en fonction du poste.*

	Endurance	Force	Vitesse
Défenseur central	Faible	Forte	Moyenne
Défenseur latéral	Moyenne	Faible	Forte
Milieu central	Forte	Moyenne	Faible
Milieu excentré	Moyenne	Faible	Forte
Attaquant	Faible	Moyenne	Forte

II. Le profil force-vitesse

1. Relation force-vitesse

D'un point de vue neuromusculaire, il existe des mouvements involontaires et volontaires. Pour rappel, le système nerveux est composé du système nerveux central (encéphale et moelle épinière) et du système nerveux périphérique (système nerveux somatique et système nerveux autonome). Lorsqu'ils sont involontaires (mouvements réflexes), ils sont contrôlés par le système nerveux périphérique. Lorsqu'ils sont volontaires, ils sont déclenchés par le système nerveux central, et plus précisément par une partie du cerveau qui se situe dans le lobe frontal, le cortex moteur. Le cortex moteur envoie un signal électrique (correspondant à la commande motrice) à la moelle épinière via les neurones pyramidaux (Wilmore et coll., 2002). Les informations sont intégrées dans la moelle épinière par l'intermédiaire d'un motoneurone alpha pour se diriger vers les muscles. A la jonction neuromusculaire, le signal est transmis à une ou plusieurs fibres musculaires provoquant ainsi une contraction volontaire du muscle (Komi, 1993). En retour, des récepteurs sensoriels golgi envoient par les neurones sensoriels, des informations sur l'état du complexe muscle-tendon à la moelle épinière. Les interneurones mettent alors en place des mécanismes pour réguler le mouvement (Duclay et Martin, 2005, Maffiuletti et coll., 2001). L'ensemble des contractions musculaires des différents groupes musculaires engendre les mouvements humains (McMahon, 1984). Ainsi, pour que le mouvement soit contrôlé, il est primordial de coordonner les unités motrices, muscles ou groupes musculaires (Kleissen et coll., 1998).

D'un point de vue biomécanique, la relation force-vitesse a été étudiée selon les propriétés mécaniques du muscle. Lors de mouvements intenses ou explosifs, le muscle peut être sollicité de différentes manières : via une contraction concentrique, excentrique ou isométrique. Il est possible d'observer les différentes sollicitations en disséquant un muscle et en mesurant la vitesse de contraction et la force produite par une contraction musculaire, notamment en reliant l'une de ses extrémités à une charge constante, puis en stimulant électriquement son nerf (De Haan, 1998). Si la force produite par le muscle est supérieure à la force appliquée, alors il se raccourcit (contraction concentrique), si la force produite par le muscle est inférieure à la force produite, alors il s'allonge (contraction excentrique) et enfin, si la force produite par le muscle est égale à la force produite, alors il n'y a pas de mouvement (contraction isométrique).

La capacité à produire une force maximale dépend de la vitesse à laquelle cette force est générée, et cette relation force-vitesse peut être mesurée de manière expérimentale.

a) Sur le muscle isolé

La première expérimentation sur muscle isolé a été faite dans les années 20 (Gasser et Hill, 1924) dans des conditions *in-vitro* (i.e., le muscle est extrait d'un corps animal). La force développée par le muscle était mesurée à plusieurs niveaux de vitesse (par l'intermédiaire de petites charges s'opposant au raccourcissement musculaire) grâce à une stimulation électrique garantissant une force maximale.

En 1935, Fenn et March s'intéressent précisément à la relation entre la force et la vitesse sur un muscle isolé (Fenn et March., 1935) puis A.V Hill en 1938. Selon A.V Hill (Hill, 1938), pionné dans le domaine, la qualité d'explosivité est directement liée aux caractéristiques mécaniques du composant contractile du muscle, et notamment à la puissance maximale produite. Hill a modélisé mathématiquement la relation entre la force produite par un muscle isolé et la vitesse de raccourcissement par une fonction inverse hyperbolique (**Figure 2**):

$$(F + a)(V + b) = b * (F_0 + a) = a * (V_0 + b) \quad (6)$$

avec F la force maximale produite, V la vitesse de raccourcissement de la fibre musculaire, F_0 la force maximale isométrique, V_0 la vitesse maximale de raccourcissement et a et b des constantes déterminant les asymptotes de la courbe hyperbolique et ayant respectivement la dimension d'une force et d'une vitesse. Cette modélisation a été confirmée par différentes études que ce soit sur un muscle isolé (Fenn et Marsh, 1935 ; Ritchie et Wilkie, 1958) ou sur des fibres musculaires isolées (Edman, 1979).

L'intersection entre la courbe et l'axe de la force équivaut à la force maximale isométrique du muscle (F_0), i.e., à une vitesse nulle. L'intersection entre la courbe avec l'axe de la vitesse équivaut à la vitesse maximale du muscle sans charge (V_0), i.e., sans production de force. Deux facteurs principaux influencent ces valeurs. D'un côté, F_0 est influencé par la surface de section du muscle et plus précisément le nombre de sarcomères en parallèle (MacIntosh et Holash, 2000). D'un autre côté V_0 est influencé par le type de fibre (I fibres « lentes », IIa, IIb fibres « rapides ») et plus précisément la vitesse des cycles d'attachement et de détachement de la myosine sur l'actine (Edman et coll., 1988 ; Gülch, 1994).

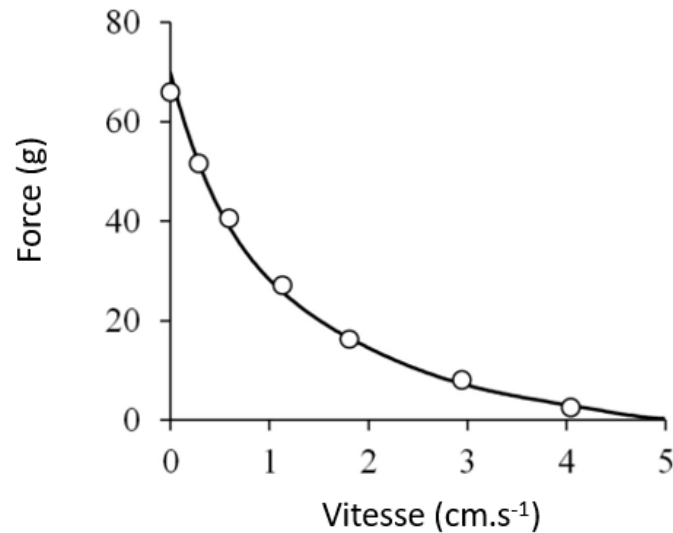


Figure 2 : Relation hyperbolique entre la force et la vitesse obtenue sur un muscle Sartorius chez la grenouille (Hill, 1938). Les points blancs représentent les données expérimentales. La courbe noire représente la modélisation de la fonction inverse.

Les capacités de puissance, déterminées par le produit de la force par la vitesse (Equation 5), peuvent être décrites en fonction de la vitesse par la relation puissance-vitesse. La relation puissance-vitesse peut être modélisée par une fonction parabolique (**Figure 3**). La puissance maximale que le muscle est capable de développer est associée à une vitesse de raccourcissement optimale et à une force précise.

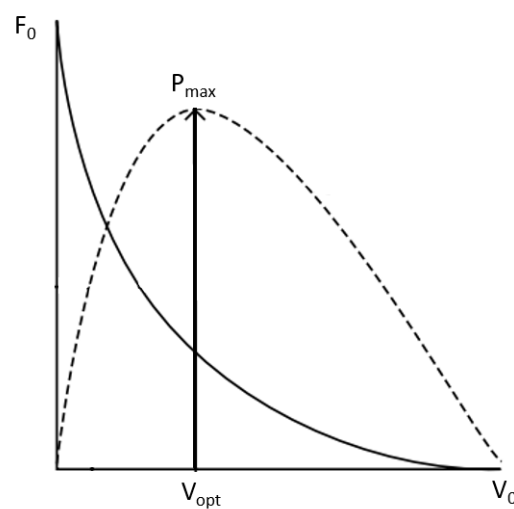


Figure 3 : Représentation schématique de la relation force-vitesse (ligne continue) et puissance-vitesse (ligne discontinue) d'un muscle isolé. La puissance maximale P_{max} est atteinte à une vitesse optimale V_{opt} (d'après Sargeant, 2007)

b) Mouvements mono-articulaires

Le mouvement mono-articulaire peut être défini comme un mouvement réalisé avec la contraction d'un seul groupe musculaire et d'une seule articulation (e.g., flexion du coude). Ainsi les relations F-v et P-v sont influencées par la vitesse du mouvement, provenant de la vitesse de raccourcissement de l'ensemble du groupe musculaire impliqué dans le mouvement. Tout comme le muscle isolé, les paramètres mécaniques de force, vitesse et puissance peuvent être extrapolés, mais ceux-ci ne sont plus mesurés au niveau muscle mais à l'extrémités du membre (e.g., au niveau de la main ou du poignet pour la flexion du coude) et la vitesse se mesure en radian par seconde.

Les relations F-v associés au mouvement mono-articulaire ont la particularité d'être encore aujourd'hui discutées (Bobbert, 2012 ; Alcazar et coll., 2019). En effet, d'un côté les premiers travaux qui se sont intéressés au mouvement mono-articulaire sur la flexion du coude (Hill, 1922; Dern et coll., 1947; Wilkie, 1949) ont confirmé une relation hyperbolique entre la force et la vitesse, comme précédemment évoquée pour le muscle isolé (Hill, 1922 ; Dern et coll., 1947 ; Wilkie, 1950). Des travaux plus récents, notamment sous fatigue, retrouvent des relations hyperboliques (Penasso et Thaller, 2018).

A partir des années 1980, au vu de l'intérêt porté au sujet pour l'amélioration de la performance sportive et le développement des ergomètres, les travaux étudiant la relation F-v se sont multipliés. A contrario, ces travaux ont principalement défié le modèle hyperbolique, notamment à forces élevés et vitesse faible. Les prédictions des mesures de forces maximales étaient majoritairement inférieures à celles du modèle F-v hyperbolique et présentaient une déviation vers le bas. Ainsi, les relations F-v lors d'un mouvement mono-articulaire humain ont été modélisées par une relation linéaire que ce soit une flexion de coude (Uchiyama et Akazawa, 1999) ou une extension de genou (Perrine & Edgerton, 1978 ; Rahmani et coll., 1999). Ces relations F-v ont d'abord été construites à partir d'ergomètres isocinétiques (Thorstensson et coll., 1976 ; Perrine & Edgerton, 1978) puis avec des ergomètres isoinertiels plus proche du geste sportif (Rahmani et coll., 1999). Enfin, étant donné que l'extrapolation de F_0 à partir de la relation linéaire F-v peut comporter un biais, une mesure directe de la force isométrique est recommandée (Rahmani et coll., 1999) pour le mouvement mono-articulaire.

c) Mouvements pluri-articulaires

Les mouvements mono-articulaires sont peu représentés, que ce soit dans la vie de tous les jours ou dans la pratique du football, et ce sont plutôt les mouvements pluri-articulaires (i.e., mobilisent plusieurs articulations) (e.g., l'ensemble des membres inférieurs) qui sont majoritairement présents.

Best et Partridge (1928) sont les premiers à s'être intéressée à un mouvement multi-articulaire de sprint en course à pied. Durant cette étude ils ont observé la force maximale des membres inférieurs appliquée au sol vers l'arrière diminuait de manière linéaire quand la vitesse augmente.

Par la suite, de nombreux travaux ont confirmé une relation linéaire entre la force et la vitesse (**Figure 4**) lors de différents mouvements pluri-articulaires comme l'extension de jambes sur presse horizontale (Yamauchi et Ishii, 2007 ; Bobbert, 2012), le squat (Bosco et coll., 1995 ; Rahmani et coll., 2001), les sauts verticaux (Davies et Young, 1984 ; Wilson et coll., 1997 ; Rahmani et coll., 2001 ; Samozino et coll., 2008, 2012), le sprint en cyclisme (Seck et coll., 1995 ; Vandewalle et coll., 1987 ; Samozino, 2005 ; Samozino et coll., 2007), ou encore le sprint en course à pied (Jaskolska et coll., 1999a ; Morin et coll., 2010, 2019).

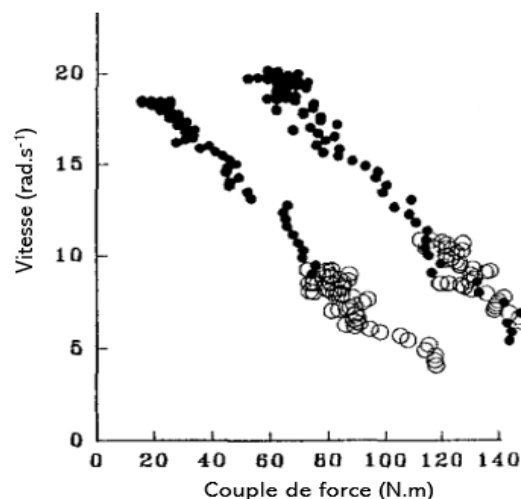


Figure 4 : Relations individuelles entre la vitesse et le couple de force (couple de freinage + couple cinétique) pendant la phase d'accélération des sprints sur un vélo ergomètre contre 19 N.m (points noirs) et 76 N.m (cercles vides) de couples de freinage chez deux sujets (d'après Seck et coll., 1994)

Les relations F-v peuvent être modélisées par une fonction affine :

$$F = F_0 \left(1 - \frac{v}{v_0}\right) \quad (7)$$

Où F_0 , V_0 et $P_{\max}$ représentent respectivement la force maximale théorique, la vitesse maximale théorique et la puissance maximale de l'ensemble des groupes musculaires participant au mouvement. Les relations P-v sont toujours décrites par des relations polynomiales de second ordre (**Figure 5**) avec une puissance maximale atteinte à une vitesse optimale, mais avec une symétrie autour de son maximum.

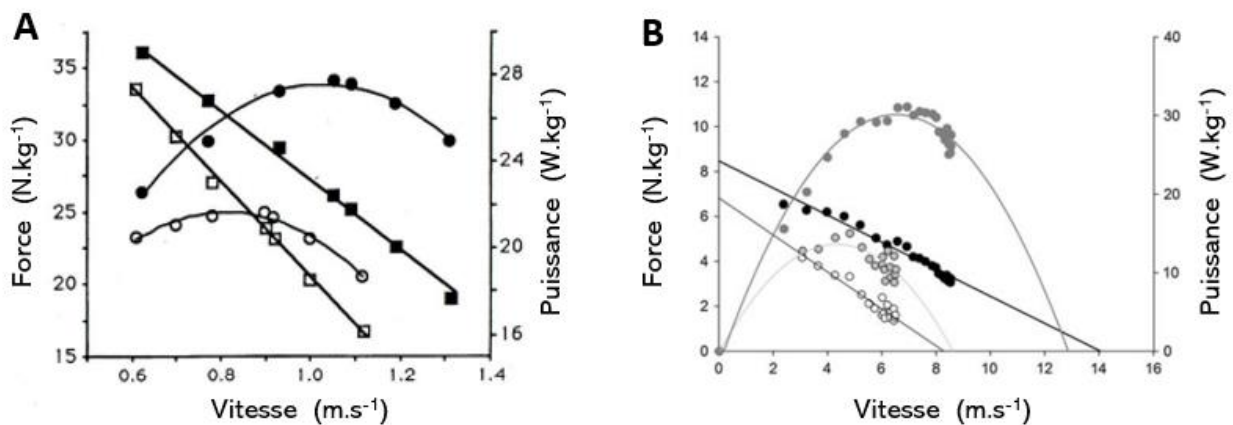


Figure 5 : A. Relations force-vitesse (carrés) et puissance-vitesse (rond) obtenues chez la femme (symbole vides) et chez l'homme (symbole remplis) lors de mouvements de demi-squats (d'après Bosco et coll., 2015) B. Relations force-vitesse et puissance-vitesse obtenues chez deux sujets lors d'un sprint de 100 m sur un tapis de course instrumenté. Les sujets 1 (cercles noirs, F-v ; gris, P-v) et 2 (cercles vides, F-v ; gris clairs, P-v) ont respectivement effectué le 100 m en 10,35 et 15,03 s (d'après Morin et coll., 2012)

La linéarité de la relation entre la force et la vitesse a d'abord été expliqué par des facteurs nerveux. En effet, les mouvements pluri-articulations ont besoin que tous les groupes musculaires impliqués dans le mouvement soient coordonnés, en plus de l'activation d'un seul groupe musculaire et des régulations nerveuses inhibitrices et excitatrices (Neptune et coll., 1997 ; Neptune et Herzog 1999 ; Samozino et coll., 2007 ; Yamauchi et coll., 2007). Or, la production de force des membres inférieurs résulte de régulations d'un ensemble de muscles, qui ont des capacités mécaniques et organisations anatomiques différentes. Ainsi une même

configuration de mouvement ne peut pas coïncider de manière optimale (conditions optimales de vitesse pour maximiser la production de force) à tous les muscles (Herzog, 2000). Puis, Bobbert a suggéré que les mécanismes neuronaux jouaient un rôle mineur dans la relation linéaire par rapport à l'impact de facteurs mécaniques (Bobbert, 2012). Selon cet auteur, la dynamique segmentaire pourrait plutôt être la cause principale de cette linéarité. Ses travaux ont montré que chaque articulation entrave progressivement la production de force musculaire à mesure que la vitesse augmente, ce qui à la fin diminue la force externe.

La relation force-vitesse inversement linéaire et la relation puissance-vitesse parabolique ont ensuite été utilisées principalement pour décrire les capacités mécaniques du système neuromusculaire pour les mouvements multi-articulaires des membres inférieurs. Les relations F-v sont considérées comme les capacités mécaniques globales des membres inférieurs à générer de la force et rendent compte des limites mécaniques de l'individu.

Dans tous les mouvements, la puissance est évaluée comme le produit de la force et de la vitesse ce qui nécessite des appareils spécifiques et coûteux pour une mesure précise et reproductible, comme des ergomètres à vélo (Arsac et coll., 1996) ou des plateformes de force (Harman et coll., 1991).

2. Profil force-vitesse horizontal

La performance en sprint, défini par la durée établie pour parcourir le plus rapidement possible une distance ne représente qu'un indicateur alternatif et indirect des capacités explosives des membres inférieurs. La performance correspond à la capacité à produire et à appliquer de grandes quantités d'énergie dans le sens horizontal i.e., des quantités élevées de force externe horizontale à différents niveaux de vitesses tout le long de la phase d'accélération (Jaskolska et coll., 1999; Morin et coll., 2011, 2012; Rabita et coll., 2015).

En 2016, une méthode simple et précise a été développée pour déterminer les relations force-vitesse et puissance-vitesse lors d'un sprint en course à pied (Samozino et coll., 2016). Inspiré du concept d'efficacité de pédalage en cyclisme, cette méthode caractérise aussi l'efficacité mécanique de l'application de la force au sol.

Le modèle biomécanique repose sur une analyse de la cinématique et de la cinétique du centre de masse (CM) du coureur pendant l'accélération en sprint, en utilisant une approche macroscopique de la dynamique inverse (Furusawa et coll., 1927 ; Helene & Yamashita, 2010). Lors d'une accélération maximale en sprint, la vitesse horizontale (v_H) est systématiquement définie par une fonction mono-exponentielle (Equation 8) , que les athlètes soient récréatifs ou hautement entraînés (i.e., Furusawa et coll., 1927 ; Chelly & Denis, 2001 ; di Prampero et coll., 2005 ; Morin et coll., 2006) :

$$v_H(t) = v_{Hmax} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (8)$$

où v_{Hmax} représente la vitesse maximale atteinte à la fin de l'accélération et τ est la constante de temps de l'accélération. La position horizontale (x_H) et l'accélération (a_H) du centre de masse (CM) du corps en fonction du temps pendant la phase d'accélération peuvent être exprimées après intégration et dérivation de $v_H(t)$ dans le temps (Equation 9, Equation 10):

$$x_H(t) = \int v_{Hmax} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) dt \quad (9a)$$

$$x_H(t) = v_{Hmax} \cdot \left(t + \tau \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}\right) - v_{Hmax} \cdot \tau \quad (9b)$$

$$a_H(t) = \frac{v_{Hmax} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)}{dt} \quad (10a)$$

$$a_H(t) = \left(\frac{v_{max}}{\tau}\right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (10b)$$

En appliquant les lois fondamentales de la dynamique dans la direction horizontale, la force nette horizontale antéro-postérieure GRF (F_H) appliquée au CM du corps peut être modélisée dans le temps comme suit :

$$F_H(t) = m \cdot a_H(t) + F_{aero}(t) \quad (11)$$

où m est la masse du corps de l'athlète (en kg) et $F_{aero}(t)$ est la traînée aérodynamique (force qui s'oppose au mouvement d'un corps dans l'air) qui est définie par :

$$F_{aero}(t) = k \cdot (v_H(t) - v_w)^2 \quad (12)$$

où v_w est la vitesse du vent, et k est le coefficient de résistance de l'air qui peut être estimé à partir de valeurs de la densité de l'air (ρ , en kg.m^{-3}), de la surface frontale du coureur (A_f , en m^2) et du coefficient de traînée ($C_d = 0.9$) (Arsac et Locatelli, 2002) :

$$k = 0.5 \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_d \quad (13)$$

Avec

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{Pb}{760} \cdot \frac{273}{273 + T^\circ} \quad (14)$$

$$A_f = (0.2025 \cdot h^{0.725} \cdot m^{0.425}) \cdot 0.266 \quad (15)$$

où $\rho_0 = 1.293 \text{ kg.m}^{-3}$, Pb est la pression barométrique (en Torr), T° est la température de l'air (en $^\circ\text{C}$) et h est la taille du coureur (en m).

La puissance moyenne nette horizontale antéro-postérieure appliquée au CM du corps (P_H en W) peut alors être modélisée à chaque instant par le produit de F_H et v_H .

Dans la direction verticale, le CM du corps du coureur, hormis pendant la phase d'accélération où il monte de la position de départ accroupie à la position de course debout, ne change pas pendant chaque phase de course. Étant donné que le mouvement ascendant initial du CM est régulé sur un temps/distance relativement long ($\sim 30\text{--}40 \text{ m}$; Cavagna et coll., 1971 ; Slawinski et coll., 2010), l'accélération verticale nette moyenne du CM sur chaque pas peut être considéré comme quasi nulle pendant toute la phase d'accélération du sprint. Par conséquent, en appliquant les lois fondamentales de la dynamique dans la direction verticale, le GRF verticale net moyen (F_v) appliqué au CM du corps sur chaque étape complète peut être modélisée dans le temps comme étant égale au poids corporel (di Prampero et coll., 2015) :

$$F_v(t) = m \cdot g \quad (16)$$

où g est l'accélération due à la gravité ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$).

Morin et coll. (2011a) ont proposé que l'efficacité mécanique de l'application de la force pendant la course puisse être quantifiée sur chaque phase par deux indicateurs : le ratio de force (RF en %, Equation 17) et la pente de décroissance du RF lorsque la vitesse augmente (D_{RF} , en $\text{\%.s.m}^{-1}$).

RF est par définition le ratio entre l'efficacité mécanique de l'application de la force horizontale au sol (F_H , en N) et la force totale résultante (F_{Res} , en N). Par exemple, un athlète ayant un ratio de force de 25% équivaut au fait que 25% de sa force totale appliquée au sol est dirigée horizontalement (dans la direction du mouvement). Plus le ratio de force est élevé, plus l'athlète est efficace et inversement.

$$RF = \frac{F_H}{F_{Res}} \cdot 100 \quad (17)$$

$$\text{Avec } F_{Res} = \sqrt{F_H^2 + F_v^2}$$

D_{RF} correspond à la décroissance linéaire du RF sur toute la phase d'accélération. Par exemple, un D_{RF} à -5% signifie que pour une augmentation de la vitesse de 1 m.s^{-1} , le RF diminue de 5%. A la fin de l'accélération, la vitesse maximale est atteinte et l'angle moyen du vecteur de force appliqué au sol est vertical.

À ce jour, les valeurs de RF ont été calculées à partir du deuxième pas (i.e., le premier pas complet) jusqu'à la vitesse maximale (Morin et coll., 2011a, b, 2012 ; Rabita et coll., 2015). Étant donné que la phase de départ (poussée et temps aérien suivant) dure entre 0,5 et 0,6 s (Slawinski et coll., 2010 ; Rabita et coll., 2015) et se produit donc à un temps moyen de 0,3 s, RF et D_{RF} peuvent raisonnablement être calculés à partir des valeurs F_H et v_H modélisées pour $t > 0,3 \text{ s}$.

Le modèle biomécanique décrit ci-dessus permet d'estimer les GRF dans le plan sagittal du mouvement lors d'une seule phase d'accélération de course de sprint à partir de données anthropométriques et spatio-temporelles. Ce modèle peut ensuite être utilisé comme une méthode simple pour déterminer les relations $F-v$ et $P-v$ et les variables associées, ainsi que les paramètres d'efficacité mécanique de l'application de la force.

3. Utilisation du profil force-vitesse horizontal

Selon Morin & Samozino (2016), les performances lors d'un saut (i.e., hauteur du saut) et d'un sprint (i.e., le temps nécessaire pour parcourir une distance donnée) dépendent principalement de la capacité des systèmes neuromusculaire et articulaire des athlètes à i) générer des niveaux

élevés de force, ii) appliquer efficacement la force sur l'environnement (i.e., appui au sol) et (iii) à produire cette force à des niveaux de vitesse élevés.

Il est important de noter que le profil F-v vertical communique des informations sur la capacité des membres inférieurs à produire une force dans une direction verticale, alors que le F-v horizontal informe sur la capacité des membres inférieurs à produire une force horizontale (spécifique lors de l'activité de course en sprint). Des études antérieures ont montré une corrélation entre les performances en saut vertical et les performances en sprints (Cronin et coll., 2007; Randell et coll., 2010; Comfort et coll., 2013 ; Loturco et coll., 2015). Jiménez-Reyes et coll. (2018) se sont intéressés à la relation entre les profils F-v horizontal vertical chez 553 athlètes (femmes et hommes, plusieurs disciplines, niveaux différents). Les résultats ont mis avant des corrélations élevées pour les performances (hauteur vs temps) (de $-0,10$ à $0,67$) et pour $P_{\max}$ (de $-0,92$ à $-0,23$) que pour F_0 (de $-0,12$ à $0,58$) et V_0 (de $-0,10$ à $0,67$). De plus, cette étude a souligné (Jiménez-Reyes et coll., 2018) que les corrélations entre les variables diminuaient à mesure que le niveau de pratique augmentait, ce qui suggère que la capacité à développer une force horizontale pendant le sprint est spécifique. Une autre étude sur des joueuses de football de haut-niveau a montré une corrélation très large pour $P_{\max}$ ($r = 0,75$) mais une corrélation triviale et modéré pour F_0 ($r = -0,14$) et V_0 ($r = 0,49$) (Marcote-Pequeño et coll., 2018). Ces résultats suggèrent ainsi que pour des athlètes de haut-niveau les évaluations du profil F-v vertical et du profil F-v horizontal fournissent des informations distinctes et complémentaires. Ainsi pour l'activité football, l'évaluation du profil F-v horizontal est primordiale pour suivre les qualités neuromusculaires associées à la performance en sprint. En plus il permet de mesurer l'efficacité mécanique de l'application de force.

*

a) Lien entre le profil force-vitesse horizontal et la performance

Lors d'un sprint, la performance est liée à la capacité à générer un maximum de force horizontale sur tout le spectre de vitesse de manière à maximiser la puissance.

Plusieurs études se sont intéressées aux déterminants de la performance en sprint (Morin et coll., 2011, 2012 ; Rabita et coll., 2015 ; Clark & Weyand, 2015) et ont montré que les paramètres de performance sur la phase d'accélération étaient liés à la vitesse horizontale maximale théorique, à la puissance maximale, à la force horizontale maximale, à l'efficacité mécanique d'application de la force au sol obtenues à partir des relations F-v et P-v, mais aussi

à la fréquence des appuis ou encore au temps de contact au sol. Des résultats récents ont montré que plus la distance de sprint considérée est courte (i.e., les phases d'accélération, e.g., jusqu'à 10 à 20 m chez les joueurs de football), plus la relation entre la performance et la production de force horizontale maximale est élevée (Seitz et coll., 2014). Deux études (Jiménez-Reyes et coll., 2019 ; Haugen et coll., 2020) ont montré que les performances (temps au 5 et 20 m ou 10 et 40 m) et les variables du profil F-v en sprint (i.e., F_0 , V_0 , P_{max}) étaient plus élevées pour les hommes (par rapport aux femmes) et pour les joueurs à des niveaux de jeu supérieur (par rapport à leurs homologues de niveau inférieur) (**Tableau 9**, **Tableau 10**). Buchheit et coll. (2014) ont constaté que F_0 , V_0 et P_{max} étaient fortement liés aux performances en accélération et en vitesse de sprint chez les joueurs des catégories U13 à U19.

Tableau 9 : Données descriptives (moyenne $\pm$ écart type) du profil force-vitesse en sprint et du temps de sprint affichés par sexe et par niveau de pratique (Jiménez-Reyes et coll., 2019).

Groupe	Division	F_0 (N.kg ⁻¹)	V_0 (m.s ⁻¹)	P_{max} (W.kg ⁻¹)	FV_{pente}	D_{RF} (%)	RF_{max} (%)	Temps 5 m (s)	Temps 20 m (s)
Joueurs	1ère (n=21)	7,35 $\pm$ 0,69	9,25 $\pm$ 0,61	16,9 $\pm$ 1,9	- 0,80 $\pm$ 0,09	- 7,08 $\pm$ 0,82	48,0 $\pm$ 3,6	1,38 $\pm$ 0,06	3,38 $\pm$ 0,12
	2nd (n=18)	7,07 $\pm$ 0,43	9,17 $\pm$ 0,49	16,1 $\pm$ 1,1	- 0,77 $\pm$ 0,07	- 7,03 $\pm$ 0,61	46,2 $\pm$ 3,2	1,40 $\pm$ 0,03	3,42 $\pm$ 0,08
	3ème (n=17)	6,77 $\pm$ 0,63	9,08 $\pm$ 0,45	15,3 $\pm$ 1,8	- 0,75 $\pm$ 0,07	- 6,78 $\pm$ 0,63	44,6 $\pm$ 3,3	1,43 $\pm$ 0,06	3,46 $\pm$ 0,11
	5ème (n=17)	6,69 $\pm$ 0,54	8,70 $\pm$ 0,49	14,5 $\pm$ 1,6	- 0,77 $\pm$ 0,07	- 7,15 $\pm$ 0,59	44,6 $\pm$ 3,3	1,44 $\pm$ 0,06	3,54 $\pm$ 0,13
Joueuses	1ère (n=19)	6,30 $\pm$ 0,43	8,12 $\pm$ 0,44	12,7 $\pm$ 1,2	- 0,78 $\pm$ 0,06	- 7,16 $\pm$ 0,54	43,9 $\pm$ 2,4	1,50 $\pm$ 0,05	3,72 $\pm$ 0,12
	2nd (n=20)	6,45 $\pm$ 0,59	7,60 $\pm$ 0,38	12,2 $\pm$ 1,3	- 0,85 $\pm$ 0,09	- 7,97 $\pm$ 0,79	41,9 $\pm$ 3,2	1,50 $\pm$ 0,05	3,78 $\pm$ 0,11

F_0 = Force maximale théorique horizontale; V_0 = Vitesse maximale théorique; P_{max} = Puissance maximale ; F-v = Force-vitesse ; D_{RF} = taux de montée en force ; RF_{max} = Ratio de force.

Enfin, des travaux récents ont étudié l'efficacité de l'application de la force au sol (Haugen et coll., 2019) en fonction de l'activité et du niveau d'athlètes masculin. Les résultats montrent que les sprinteurs élités (temps au 100 m entre 9.92 et 10.20 secondes) ont un RF_{max} (%) allant de 53 à 58,3 alors que les autres disciplines ont des valeurs inférieures à 50 (futsal élite, football masculin jeune, etc.). Ainsi le profilage de l'efficacité de l'application de la force au sol serait un critère discriminant pour la performance en sprint.

Tableau 10 : Corrélation entre les variables du profil force-vitesse en sprint et la performance en sprint (force (Haugen et coll., 2020)

	Temps 10 m (s)	Temps 40 m (s)	F ₀ (N.kg ⁻¹)	V ₀ (m.s ⁻¹)	P _{max} (W.kg ⁻¹)	FV _{pen}	RF _{max} (%)
Temps 40 m	0,96 ± 0,01						
F₀	-0,89 ± 0,01	-0,73 ± 0,03					
V₀	-0,86 ± 0,02	-0,97 ± 0,00	0,55 ± 0,04				
P_{max}	-1,00 ± 0,00	-0,97 ± 0,00	0,87 ± 0,02	0,89 ± 0,01			
FV_{pen}	-0,01 ± 0,06	-0,29 ± 0,06	-0,44 ± 0,05	0,51 ± 0,05	0,05 ± 0,06		
RF_{max}	-1,00 ± 0,00	-0,96 ± 0,01	0,89 ± 0,01	0,87 ± 0,02	1,00 ± 0,00	0,03 ± 0,06	
DRF	-0,24 ± 0,06	-0,41 ± 0,05	-0,31 ± 0,06	0,62 ± 0,04	0,19 ± 0,06	0,99 ± 0,00	0,16 ± 0,06

F₀ = Force maximale théorique horizontale ; V₀ = Vitesse maximale théorique ; P_{max} = Puissance maximale ; F-v = Force-vitesse ; DRF = ; RF_{max} = Ratio de force.

b) Développement des qualités neuromusculaires

La littérature s'est intéressée à l'impact de programmes d'entraînement individualisé basé sur le profil F-v, que ce soit sur l'évolution des qualités neuromusculaires en elles-mêmes et par conséquent sur les performances. Comme évoqué précédemment, alors que les programmes d'entraînement individualisé basés sur le profil F-v vertical ont montré une pauvre ou triviale amélioration sur les performances en sprint (Lindberg et coll., 2021) ceux basés sur le profil F-v en sprint se sont montrés plus efficaces (Barrera-Domínguez et coll., 2023).

Pour favoriser le développement de la force horizontale et le gain de performance sur des courtes distance (5 à 10 mètres), les programmes d'entraînements sont principalement à base d'exercices avec une résistance horizontale (chariots, traîneaux, parachute, etc.). Une résistance ou des charges élevées sont utilisées pour faciliter le développement des propriétés de force à faibles vitesses et une faible résistance ou des charges plus légères sont utilisées pour atteindre des vitesses plus élevées et ainsi tout le spectre de vitesse. Des travaux proposent, en plus d'utiliser la relation charge-vitesse pour cibler précisément les niveaux de force à développer

(Lahti et coll., 2020 ; Cahill et coll., 2020) (**Figure 6**). Ces programmes d'entraînements ont vocation à modifier la relation F-v avec un biais vers l'orientation de la force (Petrakos et coll., 2015 ; Bolger et coll., 2015 ; Tufano et coll., 2018 ; Upton, 2018 ; Cahill et coll., 2020 ; Lahti et coll., 2020). D'un autre côté, pour favoriser le développement de la vitesse maximale et le gain de performance sur des distances longues (supérieure à 25 à 30 m), les programmes d'entraînements sont principalement basés sur du sprint avec une très faible résistance, aucune résistance (stimuli à des vitesses maximales) ou voir même assisté (stimuli à des vitesses supra maximales via e.g., course en descente, élastique). Ces programmes d'entraînements ont vocation à modifier la relation F-v avec un biais vers l'orientation de la vitesse (Upton, 2011 ; Cahill et coll., 2020 ; Tufano et coll., 2018). Il est intéressant d'ajouter que l'entraînement de la qualité de vitesse maximale s'est montré à la fois légèrement bénéfique pour l'accélération et la vitesse maximale, mais le développement de la capacité maximale de production de force horizontale s'est montré plus efficace pour améliorer la capacité d'accélération en sprint (Morin et coll., 2016 ; Los Arcos et coll., 2014 ; Meylan et coll., 2014 ; Randell et coll., 2010).

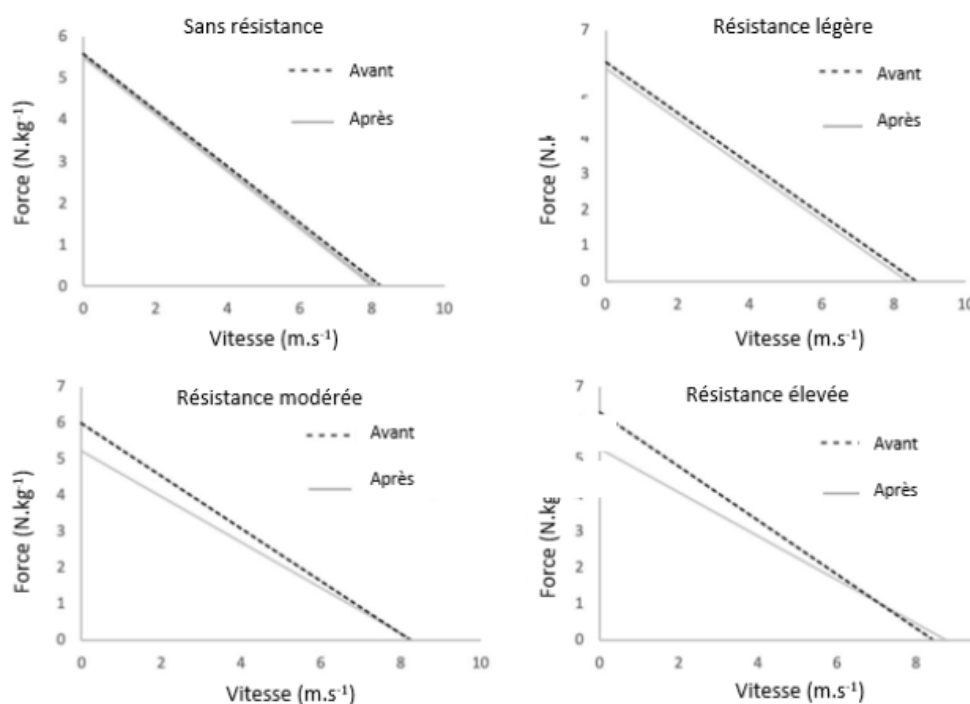


Figure 6 : Évolution du profil force-vitesse (avant et après les 8 semaines d'entraînements comprenant deux séances par semaines) en fonction de la charge des chariots (respectivement une résistance qui réduit la vitesse de 0, 25, 50 et 75 %) chez des jeunes sportifs (d'après Cahill et coll., 2020)

c) Individualisation de l'entraînement

L'accélération et la vitesse maximale sont deux qualités distinctes qui peuvent être considérées comme étant déterminées par une combinaison de multiples facteurs spécifiques (physiologiques, métaboliques, biomécaniques et morphologiques). Plusieurs études (Harris et coll., 2008 ; Little et Williams, 2005) ont montré que la corrélation entre la vitesse maximale et l'accélération en sprint étaient modérée. Ces résultats suggèrent que l'accélération et la vitesse maximale sont des qualités spécifiques nécessitant des approches d'entraînement différentes (Haugen et coll., 2013). Pour répondre à ce besoin, le profil F-v a fait l'objet d'une attention croissante comme outil permettant la prescription d'un entraînement individualisé chez les athlètes. L'accélération est principalement influencée par le développement de forces concentriques, l'impulsion et l'activité des extenseurs du genou et de la hanche (Dorn et coll., 2012). A contrario, la vitesse maximale est davantage liée au cycle d'étirement-raccourcissement, à la raideur des membres inférieurs et à l'activité des extenseurs de hanche (Harris et coll., 2008 ; Sleivert et Taingahue, 2004 ; Weyand et coll., 2010). Buchheit et coll., (2014) ont montré que les performances individuelles des jeunes footballeurs élite en matière d'accélération et de vitesse maximale variaient principalement par rapport à la capacité à appliquer une force mécanique horizontale et non par rapport à la qualité de vitesse. Ces résultats ont mis en avant la nécessité d'individualiser les contenus d'entraînement en fonction des caractéristiques mécaniques des joueurs et des exigences du terrain (Di Salvo et coll., 2010 ; Mendez-Villanueva et coll., 2010 ; Varley et Aughey, 2013). Par ailleurs, plusieurs études se sont intéressées à l'impact du niveau de maturation et bien que les performances soient liées à l'âge et au niveau de maturation (Mendez-Villanueva et coll., 2011 ; Baumgart et coll., 2018 ; Fernández-Galván et coll., 2021), les résultats suggèrent que les besoins spécifiques de l'athlète doivent être indistinctement surveillés de l'âge ou du niveau de maturation mais en fonction de besoins spécifiques de l'athlète. Le profil F-v permet de déterminer de manière précise et plus détaillé (par rapport uniquement aux temps de passages) quelles sont les propriétés mécaniques liées à la performance et ainsi d'individualiser l'entraînement (Samozino et coll., 2016, Morin & Samozino, 2016), indépendamment de l'âge, du sexe ou du niveau.

En pratique, pour améliorer les performances en sprint d'un athlète un programme d'entraînement individualisé peut être construit à partir du profil F-v. Ce programme se concentre principalement sur l'augmentation de la puissance en améliorant les composants de force et de vitesse ou sur la technique d'application de la force au sol (Morin et coll., 2011). Le

programme peut être déterminé selon différents critères : soit il est construit en fonction des forces et faiblesses relatives au profil F-v de chaque joueur ; soit avec il est basé sur la comparaison du profil F-v par rapport aux profils F-v du reste de l'équipe, soit en fonction de la distance sur laquelle l'accélération du sprint doit être optimisée (spécifique à l'activité, au poste, etc.) (**Tableau 11**). Très simplement, un athlète ayant un déficit de force horizontale devrait prioriser son entraînement sur un travail de force horizontale alors qu'un athlète ayant un déficit de vitesse devrait orienter son entraînement sur un travail de sprint à vitesse maximale (Morin & Samozino, 2016).

Tableau 11 : Profil force-vitesse horizontal recommandé associés aux qualités neuromusculaires pour la performance spécifique au poste chez les joueurs de football professionnel

	Force	Vitesse	Profil F-v
Défenseur central	Forte	Moyenne	Orienté Force
Défenseur latéral	Faible	Forte	Orienté Vitesse
Milieu central	Moyenne	Faible	Équilibré – Orienté Force
Milieu excentré	Faible	Forte	Orienté Vitesse
Attaquant	Moyenne	Forte	Équilibré – Orienté Vitesse

4. Évaluation du profil force-vitesse horizontal : du laboratoire au terrain

a) Plateforme de force

Avant le développement de la méthode de Samozino (2016), le test de référence pour évaluer la cinétique du sprint nécessitait l'utilisation des plateformes de forces connectées en série et intégrées dans le sol. La plateforme de force est une plaque instrumentée. Souvent en duo, pour la jambe droite et la jambe gauche, elle peut aussi être connectée en série. Commercialisé en 1976 pour la première fois, les plateformes de forces sont des outils de laboratoires

permettant comme son nom l'indique de calculer les forces appliquées au sol selon trois plans : le plan vertical (F_z), le plan horizontale (F_y) et le plan transverse (F_x) (**Figure 7**). Elles sont basées sur la troisième loi de Newton en calculant les forces de réaction au sol (GRF). Connectées en série, elles permettent de mesurer le déplacement, la vitesse et l'accélération du centre de masse d'un sujet à chaque instant d'un mouvement (Cavagna, 1975 ; Weyand et coll., 2000).

Le centre de pression (CP) est, par définition, le point d'application de la force verticale résultante agissant sur le corps. Les coordonnées de ce point dans le référentiel de la plate-forme peuvent être calculées à partir des forces et moments de force mesurés :

$$COP_x = \frac{-M_y \pm \sqrt{F_x * dz}}{F_z}$$

$$COP_y = \frac{-M_x \pm \sqrt{F_x * dz}}{F_z}$$

où F représente la force, M le moment de la force et dz le bras de moment des forces de cisaillement par rapport au centre du système de coordonnées. Sur certaines plates-formes, $dz = 0$, alors que sur d'autres, il est de l'ordre de quelques centimètres. Étant donné que dans la plupart des études, le sujet ne se tient pas exactement au-dessus de l'origine du système de coordonnées, les déplacements du CP sont intéressants plutôt que ses coordonnées absolues.

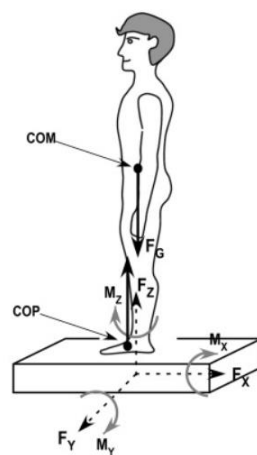


Figure 7 : Une plate-forme de force mesure trois composantes du vecteur de force (F_x , F_y et F_z) et trois composantes du vecteur de moment de force (M_x , M_y et M_z). COM : centre de masse ; COP : centre de pression (Latash, 2012)

Lorsqu'une personne se tient sur une plate-forme de force, les signaux peuvent être utilisés pour estimer le mouvement de la projection du centre de masse (CM) sur un plan horizontal. Selon la deuxième loi de Newton :

$$F_x = m * a_x$$

$$F_y = m * a_y$$

Où F représente la force, a l'accélération et m la masse. La masse de la personne peut être estimée à partir de la composante de force verticale mesurée :

$$F_z = m * g$$

où g est l'accélération gravitationnelle (9.81 m.s⁻²). Ainsi, l'accélération a (m.s⁻²) du CM est relativement facile à calculer à partir des signaux de la plate-forme.

$$a_x = \frac{F_x}{m}$$

$$a_y = \frac{F_y}{m}$$

$$a_z = \frac{F_z}{m} - g$$

L'intégration par rapport au temps t de l'accélération sur chacune des composantes permet de déterminer la vitesse instantanée v (en m.s⁻¹) du CM puis une seconde intégration par rapport au temps permet d'obtenir le déplacement instantané d (en m) du CM :

$$v = \int a \, dt + v_0$$

$$d = \int v \, dt + y_0$$

Avec v₀ = 0 et y₀ = 0 lorsqu'une période d'immobilité précède le saut ou le déplacement à t₀.

Enfin la puissance est calculée à chaque instant en tant que produit de la force par la vitesse.

La plateforme de force reste aujourd'hui le « gold-standard » pour établir le profil force-vitesse. Cependant sur les mouvements horizontaux, comme l'analyse d'une phase d'accélération

complète d'un sprint (de 0 à la vitesse maximale chez les athlètes), les protocoles expérimentaux sont lourds (laboratoire) et les procédures de traitement des données aussi, ce qui ne permet pas de s'adapter de manière cohérente avec les conditions in-situ et les exigences terrain des praticiens.

b) Le transducteur de position linéaire

Le transducteur de position linéaire ou capteur filaire constitué d'un câble encodé relié à un encodeur dans un boîtier. L'extrémité du câble est raccordée à l'objet (e.g., sur une barre de squat ou de développé couché) dont le mouvement est étudié. Pendant le mouvement le câble va s'enrouler puis se dérouler dans le boîtier et l'encodeur va transformer les informations de longueur du câble physique à chaque instant en information de vitesse numérique via un lecteur optique.

La vitesse instantanée v est ainsi déduite du déplacement et du temps à partir de la formule : $v = d/t$. Par la suite, l'accélération est obtenue par la dérivée de la vitesse. Enfin la force et la puissance sont obtenus via la même procédure que pour la plateforme de force.

Le transducteur de position linéaire est un outil très précis étant basé sur une méthode physique. Cependant une des limites principales est le caractère linéaire du trajet moteur, ce qui implique que les mouvements doivent rester linéaires. Plusieurs études ont récemment montré la validité et la reproductibilité des mesures sur des mouvements de sprint, notamment via le dispositif de tirage horizontal 1080 sprint (Cross et coll., 2019 ; Lahti et coll., 2020).

c) Radar et laser

Les appareils laser et radar sont des capteurs permettant de mesurer la vitesse de défilement. Ils fonctionnent tous les deux sans contacts et utilisent l'effet Doppler. Ainsi il permet de mesurer des vitesses de déplacement. Pour rappel, l'effet Doppler a été décrit pour la première fois par Christian Doppler en 1842. Il s'agit d'un phénomène physique qui décrit le changement de fréquence et de longueur d'onde des ondes, telles que le son ou la lumière, lorsqu'il y a un mouvement relatif entre la source des ondes et l'observateur. Lorsque la source se rapproche de l'observateur, les ondes sont compressées, entraînant une fréquence plus élevée, et lorsque la source s'éloigne, les ondes sont étirées, entraînant une fréquence plus basse.

Les systèmes laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) émettent un faisceau de lumière et mesurent le temps nécessaire à la lumière pour se refléter sur les objets. La distance est déterminée en analysant le temps de vol ou le déphasage de la lumière. Ils offrent une précision et une exactitude élevées pour mesurer des distances courtes à modérées. Le pistolet de vitesse laser est un dispositif de contrôle optique permettant de diriger le faisceau vers le bas du dos de l'athlète. Pendant tout le sprint, la vitesse de l'athlète et la distance par rapport au laser est enregistrée à 50 ou 100 Hz. La vitesse calculée à partir des données laser brutes distance-temps doit passer par un processus de filtrage, normalement avec une coupure de 3 Hz (Harrison et coll., 2005). Concernant la validité, l'erreur du laser LAVEG dans la détermination de la distance parcourue a été estimée à 0.1 ± 0.06 m par rapport aux mesures vidéo 50 Hz (Arsac et coll., 2002). Par rapport à la technologie vidéo à une fréquence de 100 Hz, Bezodis et coll. (2012) ont observé que le biais de vitesse le plus élevé se produit à 1 m et diminue à mesure que la distance de mesure augmente. Le pistolet laser s'est par ailleurs montré comme reproductible avec un ICC entre 0.96 et 0.99 (Harrison et coll., 2005 ; Bevan et coll., 2010 ; Duthie et coll., 2006) et un CV entre 0.7-1.9 % (Duthie et coll., 2006 ; Poulos et coll., 2010) pour la vitesse de course. Dans l'ensemble, le laser LAVEG le pistolet est un outil reproductible pour évaluer les performances de sprint en ligne droite (Bezodis et coll., 2012).

Le radar (Radio Detection and Ranging) fonctionne en émettant des ondes radio et en détectant leurs réflexions sur les objets de l'environnement. Il mesure le temps nécessaire aux ondes radio pour rebondir, fournissant des informations sur la distance, la vitesse et la direction des objets. Les systèmes radar sont largement utilisés dans le contrôle du trafic aérien, la surveillance météorologique, la navigation, les systèmes anticollision et la surveillance militaire. Ils excellent dans la détection d'objets dans différentes conditions météorologiques et offrent une couverture à longue portée. Plusieurs auteurs ont rapporté une corrélation parfaite entre le pistolet radar Stalker ATS 35 Hz (Radar Sales, Minneapolis, Minnesota, USA) et les cellules photoélectriques (Chelly et coll., 2001 ; Morin et coll., 2006).

De nombreuses études ont utilisé les technologies radar (fréquence d'acquisition proche de 50 Hz) et laser (fréquence d'acquisition supérieure à 300 Hz) pour l'évaluation du profil force-vitesse en sprint (Samozino et coll., 2016 ; Simperingham et coll., 2019 ; Runacres et coll., 2019 ; Jimenez-Reyes et coll., 2019 ; Mendiguchia et coll., 2016 ; Cross et coll., 2015, 2018) même s'il existe de légères variations dans la phase première phase d'accélération (0 à 5 m) qui

peuvent réduire la reproductibilité du radar (Bezodis et coll., 2012) par rapport à la plateforme de force.

d) Systèmes de portes de chronométrages

Les systèmes de portes de chronométrages sont des systèmes permettant de mesurer le temps écoulé par un objet ou une personne lorsqu'il passe à travers une ou plusieurs portes. Aujourd'hui, de nombreux systèmes se sont développés à des prix très variables (de 100 € à 20.000 €) en fonction de la technologie utilisée (caméra, laser, transpondeur, etc.), de la précision ou encore des options ou accessoires disponibles (nombre de portes, tableau d'affichage, transfert des données, compatibilité, résistance à l'eau, transportable, etc.).

Dans l'activité football, les cellules photoélectriques sont très souvent utilisées comme des systèmes de portes de chronométrages (Witty, Tendo, Brower, Dashr, etc.). Elles sont constituées d'un émetteur de lumière (généralement une diode électroluminescente) et d'un récepteur (phototransistor ou photodiode). L'émetteur envoie un faisceau lumineux vers le récepteur. Lorsqu'un objet ou athlète passe entre l'émetteur et le récepteur, il interrompt le faisceau lumineux, ce qui provoque une variation du courant dans le récepteur et détecte le temps de passage. Il existe des cellules à faisceau unique ou à double faisceaux. Tous deux ont été montrés comme reproductible (Haugen et coll., 2012), mais des études antérieures ont mis en évidence que les portes de synchronisation à double faisceau ou post-traitement sont supérieures à celles avec un faisceau unique en termes de reproductibilité, car les membres oscillants peuvent provoquer de faux signaux (Haugen et coll., 2014 ; 2016). Morin & Samozino (2016) ont démontré qu'un minimum de cinq temps intermédiaires (ex. 5, 10, 20, 30 et 40 m) était nécessaire pour obtenir des données précises concernant les variables ($P_{\max}$, F_0 , V_0 , SFV, $RF_{\max}$ et DRF) du profil force-vitesse en sprint avec des cellules à double faisceaux. Haugen (Haugen et coll, 2018) a étudié avec ces mêmes cellules plus spécifiquement l'impact de la configuration de ces portes sur les variables du profil F-v en sprint et a montré que seulement trois portes pouvaient être suffisantes à condition que toute la phase d'accélération soit prise en compte.

e) Systèmes de caméras à grande vitesse

Les récentes caméras permettent d'enregistrer des vidéos avec une fréquence d'échantillonnage élevée permettant d'analyser à posteriori la vidéo dans un logiciel informatique adapté. Les enregistrements vidéo avec des caméras à grande vitesse fournissent suffisamment d'informations pour une analyse valide du temps de sprint lorsqu'ils sont par la suite importés dans un programme informatique d'analyse vidéo. Chelly et coll (2009) ont rapporté une corrélation presque parfaite ($r = 0.99$) lorsque les calculs de vitesse à partir d'enregistrements vidéo (Sony DCR-PC105E, Japon) ont été comparés des cellules de vitesses. Harrison et coll (2005) ont rapportés des mesures reproductibles avec des caméras à 50 et 100 Hz quand elles ont été comparées au système laser. Ainsi, la synchronisation basée sur la vidéo est valide et reproductible dans le suivi des performances de sprint. Cependant, les enregistrements devant être transférés vers un logiciel d'analyse vidéo dédié, les mesures de vitesses sont connues à posteriori. Ceci est particulièrement peu pratique lors de plusieurs sprints ou de groupe d'athlètes.

Cependant, le développement d'une application smartphone, nommé MySprint, a permis de simplifier l'utilisation de la vidéo. Le développement de cette application par Balsalobre-Fernández et coll. (2015) a été possible avec l'avènement des smartphones disposant d'une caméra à grande vitesse capable d'enregistrer à 240 images par seconde (iPhone 6). L'application a été montrée comme valide et reproductible si le protocole d'évaluation est appliqué rigoureusement et utilisé dans plusieurs études (Romero-Franco et coll., 2017 ; Marcote-Pequeño et coll., 2018).

Les avantages de cette application sont nombreux : elle ne nécessite aucun outil supplémentaire hormis son smartphone ou sa tablette, elle est disponible à un prix très abordable (< 10€), elle est transportable en tout lieu (déplacement, terrain, etc.), son utilisation est simple et les résultats sont disponibles immédiatement.

Le fonctionnement de l'application est simple, mais le protocole d'évaluation demande d'être rigoureux et précis pour un résultat exploitable. La première étape consiste à créer le profil de l'athlète avec des mesures individuelles (taille, poids) prises en amont. La deuxième étape consiste à préparer la piste de sprint sur une distance de 30 mètres avec les repères de courses aux distances précisées par le protocole (5.57, 10.28, 15, 19.72, 24.43 et 29.15 mètres) et placer son smartphone sur un trépied à 10 mètres de la piste de sprint en face des 15 mètres (c'est-à-

dire à la moitié de la piste). A noter que les distances des repères ne sont pas égales dû à la parallaxe (ce qui équivaldrait à la mesurer à 5, 10, 15, 20, 25 et 30 mètres si le smartphone se trouvait dans l'axe). La troisième étape consiste à contrôler le départ du sprint de l'athlète (immobile en position de départ) et filmer son sprint. La quatrième étape, la plus cruciale, consiste à lire la vidéo et baliser les temps de passages à partir de chaque marqueur en déterminant à chaque fois que le centre de masse de l'athlète est aligné avec le piquet. Cependant, lors de l'évaluation d'une équipe complète dans un sport collectif, l'évaluation peut être chronophage et faire perdre du temps sur la séance. Ainsi il est conseillé de prendre les mesures en amont de la séance, d'enregistrer les vidéos de sprints sur la galerie du téléphone, puis à posteriori d'insérer les vidéos dans l'application pour le balisage et traitement des données. Cet outil se montre très prometteur pour évaluer les profils F-v en sprint, mais le traitement pour l'ensemble d'un groupe reste chronophage et la sensibilité du balisage peut avoir un fort impact sur les résultats.

5. Le profil accélération-vitesse *in-situ*

L'évaluation du profil F-v doit être fait de manière régulière pour avoir un profil « à jour ». De la même manière, il n'est pas toujours possible pour un joueur d'effectuer un sprint linéaire maximale pour observer l'évolution de ses qualités neuromusculaires. Pour cette raison, les nouvelles recherches s'orientent vers une collecte des données *in-situ* (i.e., pendant l'activité) de manière à « évaluer » indirectement et en continu, dans des conditions de jeu (Morin et coll., 2021), les qualités d'accélération et de vitesse.

En 2021, Morin et coll. (Morin et coll., 2021) ont développé une nouvelle méthode pour déterminer la relation accélération-vitesse pendant l'activité spécifique (e.g., le football) sans intervention. Cette relation est modélisée par le profil accélération-vitesse *in-situ* (A-S) et met en relation les données d'accélération en fonction de la vitesse. Cette méthode consiste, à partir des données GPS récoltées à l'entraînement et/ou en match, à construire une relation linéaire entre l'accélération et la vitesse de manière à extrapoler les qualités de vitesse et d'accélération maximale théorique dans un contexte écologique. Le profil A-S représente la capacité d'accélération maximale d'un joueur (résultant de la force propulsive dans la direction horizontale, conformément aux lois de Newton) sur l'ensemble du spectre de vitesse de course. Conceptuellement, les informations fournies par le profil A-S sont proches du profil de F-v en

sprint. Elle permet (i) d'évaluer les capacités d'accélération et de vitesse spécifiques à l'activité en récoltant des données sans intervention, (ii) de s'affranchir d'une évaluation et (iii) suivre les informations en continu (Morin et coll., 2021).

Cette méthode est inspirée du concept de « Profil Puissance Record » (« record power profile » en anglais, dit PPR) en cyclisme (Pinot et Grappe, 2011). Le PPR consiste à récolter les données de puissance à chaque entraînement de cyclisme via un capteur de puissance sur le vélo. Les données de puissance sont ensuite mises en relation avec la durée d'exercice. Cette relation puissance-temps permet d'évaluer et de suivre le potentiel du cycliste (de quelques secondes à une sortie longue, i.e., de l'explosivité à l'endurance) sans passer par une évaluation en laboratoire.

D'un point de vue méthodologique, les données brutes de vitesse récoltées avec le GPS permettent de calculer l'accélération comme étant la dérivée de la vitesse en fonction du temps. Un nuage de points est construit à partir des données de vitesse et de l'accélération positive. Un seuil de vitesse de 3 m.s^{-1} a été défini par Morin et coll. (2021) car la vitesse du centre de masse augmente rapidement à 3 m.s^{-1} au cours de la première étape d'une accélération de sprint, et cette vitesse correspond généralement à l'apparition de valeurs d'accélération maximales chez les footballeurs professionnels (Morin et coll., 2019 ; Nagahara et coll., 2014). Deux valeurs maximales d'accélération pour chaque sous-intervalle de 0,2 à partir de 3 m.s^{-1} jusqu'à la vitesse maximale sont utilisées pour effectuer une première régression linéaire. Ensuite, pour améliorer la précision globale du modèle, les points qui ne sont pas dans l'intervalle de confiance à 95 % sont enlevés et une deuxième et dernière régression linéaire permet de délimiter le profil A-S individuel. Cette régression linéaire a permis d'extrapoler trois variables principales : A_0 (accélération maximale théorique) et S_0 (vitesse maximale théorique) comme étant les intercepts de la régression linéaire et respectivement de l'axe y et x et AS_{pente} (pente de la régression linéaire) calculé comme suit : $AS_{\text{pente}} = -A_0 / S_0$. Ces variables caractérisent le profil A-S du joueur individuel (**Figure 8**).

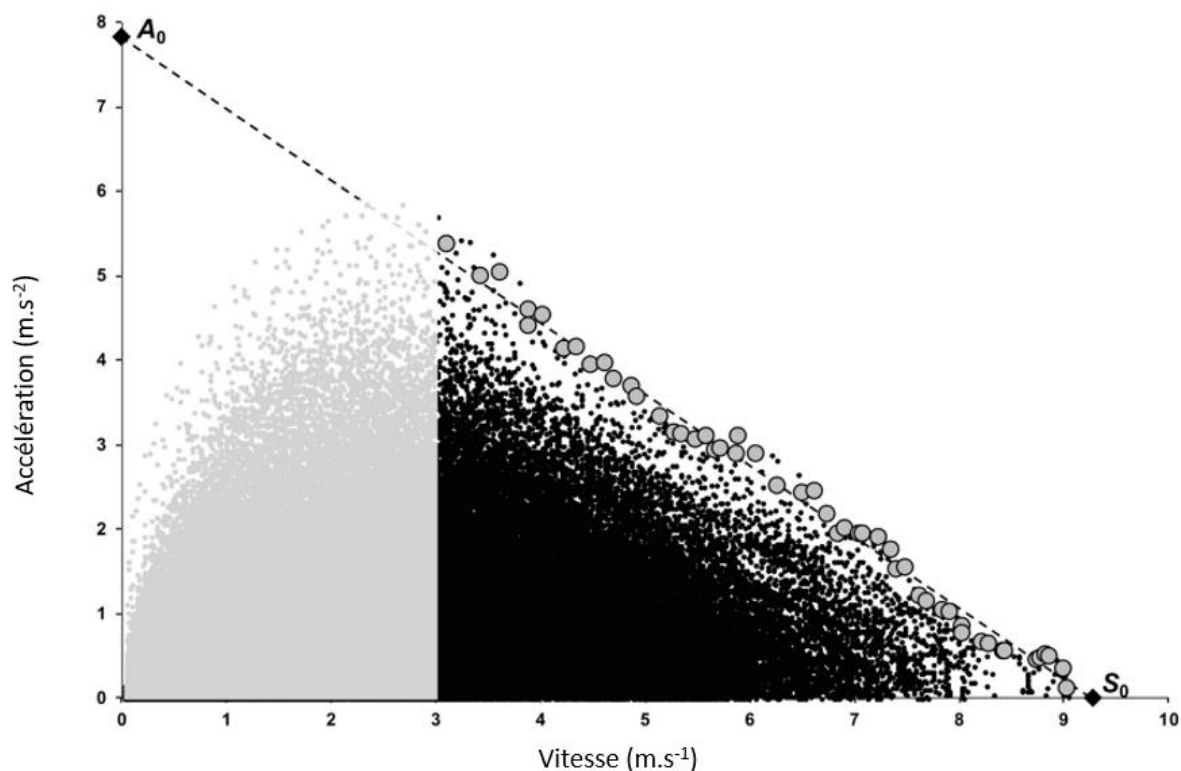


Figure 8 : Exemple d'un profil accélération-vitesse in-situ (A-S). Les points noirs sont les données brutes obtenues à partir de 8 séances d'entraînement de football. Les points gris sont les points utilisés pour construire le profil A-S linéaire (ligne en pointillé) à partir duquel A_0 et S_0 sont extrapolées. A_0 : accélération maximale théorique ; S_0 : vitesse maximale théorique (issu de Morin et coll., 2021)

Dans ces premiers travaux, Morin et coll. (2021) ont observé une relation accélération-vitesse presque parfaitement linéaire pour tous les joueurs de football professionnels ainsi que des valeurs de A_0 et S_0 très variables entre les joueurs. De plus, cette étude a mis en avant une très bonne reproductibilité constatée entre les semaines (erreur aléatoire < 8 %) et des valeurs de S_0 ($9,21 \pm 0,43$) et A_0 ($7,70 \pm 0,53$) proches des valeurs de tests de sprints standardisés (Haugen et coll., 2020a ; Samozino et coll., 2016 ; Jiménez-Reyes et coll., 2018, 2020). Enfin, les différences systématiques dans le profil A-S individuel entre les semaines et les multiples questions relatives à la construction méthodologique mettent en avant la nécessité de mettre en place davantage d'études.

6. Résumé

La relation force-vitesse peut être influencée par différents facteurs et cette relation est considérée comme linéaire lors de mouvements pluri-articulaires tels que la course en sprint. L'évaluation du profil force-vitesse permet d'individualiser l'entraînement de manière à maximiser les qualités de puissance et optimiser les performances. Le développement du profil F-v ont permis de démocratiser l'évaluation des qualités de force, de vitesse et de puissance. La méthode permettant de déterminer le profil F-v en sprint (Samozino, 2016) permet de s'affranchir du test de référence (Weyand et coll., 2000), inaccessible pour la plupart des athlètes, et laisse l'opportunité d'être évalué à partir de nouveaux outils. Les données de vitesse-temps sont utilisées pour extrapoler le profil F-v. Les outils permettant de récolter ses données de manière reproductible et précise se sont multipliés ces dernières années (e.g., radar, laser, vidéo, transducteur de position linéaire, etc.). Les protocoles d'évaluation et le traitement des données sont à respecter et reproduire très rigoureusement pour extrapoler des données valides et reproductibles. Cependant dans l'environnement du football professionnel il n'est pas toujours simple de les mettre en place, principalement du fait d'un calendrier très congestionné (Carling et coll., 2016) et du caractère maximal de l'évaluation. Une nouvelle méthode (Morin et coll., 2021) permet d'évaluer en continu les qualités de vitesse et d'accélération spécifiques à l'activité en récoltant les données GPS, sans intervention et sans évaluation.

III. Système de positionnement par satellites (GPS)

1. Naissance et fonctionnement du GPS

Le GPS (système de positionnement par satellites, dit « Global Positioning System »), système mondial de positionnement, ou géo-positionnement par satellite) a été conçu par le département de la Défense des Etats-Unis dans les années 1970 à des fins militaires. Ce système nécessite trois segments : un segment spatial (les satellites en orbite autour de la Terre), un segment contrôle (les stations de contrôle), un segment utilisateur (les récepteurs GPS). Le projet a été lancé en 1973, le premier satellite a été testé en 1978, et enfin le système est complètement opérationnel en 1995 avec vingt-quatre satellites. Aujourd'hui la constellation située à une altitude de 20 184 km comporte 31 satellites en fonctionnement et est organisée autour de 24 principaux (27 depuis 2011 en cas de panne ou d'indisponibilité). Les satellites sont disposés en six plans orbitaux équidistants entourant la Terre. Chaque plan contient quatre emplacements occupé par des satellites. Cet arrangement à 24 emplacements permet aux utilisateurs de visualiser au moins quatre satellites depuis pratiquement n'importe quel point de la planète. Le GPS étant une propriété des Etats-Unis, d'autres nations ou territoires ont développés leur propre système au vu du grand succès engendré et conscients de l'intérêt stratégique. La Russie a développé le système GLONASS, l'Europe le système GALILEO et la Chine le système BEIDOU. L'ensemble de ces systèmes sont aujourd'hui appelés des systèmes de positionnement par satellites désigné sous le sigle de GNSS (Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites). Ainsi le terme GPS peut être un abus de langage assez courant, puisque le terme GNSS devrait être utilisé dans certaines situations. Le GPS est rendu accessible au grand public dans les années 1980. Aujourd'hui ils font partis intégrants de notre quotidien que ce soit pour un usage domestique (smartphone principalement) ou dans d'autres domaines (navigations, scientifique, etc.). Son utilisation s'est par la suite très largement démocratisée dans le milieu sportif, que ce soit dans les sports collectifs (football Australien, football Américain, rugby, football, etc.) ou individuels (cyclisme, trail, natation, etc.) grâce à leur très rapide évolution.

Le système est basé sur l'émission de signaux provenant de satellites en orbite autour de la Terre. Tout récepteur GPS peut capter les signaux. Chaque récepteur est équipé d'un logiciel

permettant de traiter les informations reçues et déterminer la position. La précision de la position dépend de la géométrie du système des satellites qui peut être mesurée par la métrique DOP (« Dilution of Precision », i.e., diminution de la précision), ou plus précisément HDOP pour la précision horizontale. Plus le HDOP est petit, plus la précision est élevée. De manière à obtenir une position précise, le GPS doit être utilisé dans un environnement extérieur, dégagé et un minimum de structure métallique environnante. Dans l'activité football, le nombre de satellites doit être maximisé (supérieur à 6) et la précision horizontale (HDOP) minimisée (idéalement inférieure à 1) (Malone et coll., 2017). Enfin le taux (ou fréquence) d'échantillonnage d'un GPS, exprimé en Hertz (Hz), est le nombre de fois où les satellites et le GPS communiquent par seconde (e.g., un GPS avec taux d'échantillonnage égale à 1 Hz reçoit une position par seconde, un taux d'échantillonnage égal à 10 Hz reçoit dix positions par seconde, etc). Ainsi la fréquence d'échantillonnage d'un GPS est une variable importante. Enfin, l'accès à plusieurs constellations (e.g., GALILEO, GLONASS, etc.) permet de maximiser le réseau de satellites et ainsi de potentiellement augmenter la précision du signal.

2. Utilisation dans le football

Avec les systèmes par vidéo, le GPS est l'outil le plus utilisé pour le suivi de charge d'entraînement dans le football moderne. Selon Buchheit et Simpson (2017), il existe trois principaux domaines d'applications principaux dans le football : la première application concerne une meilleure compréhension de l'activité (fournir une évaluation objective, en live ou a posteriori de la charge externe et des exigences locomotrices d'une séance ou d'un match) ; la deuxième application concernant l'optimisation des modèles de charge d'entraînement au niveau de l'équipe ; la troisième application concerne la prise de décision sur les programmes d'entraînement individuels des joueurs pour améliorer les performances et prévenir les blessures (e.g., entraînement complémentaire, atteinte d'un pourcentage de vitesse max, progressivité du retour après blessure, etc.) (Buchheit & Simpson, 2017). La littérature scientifique s'est enrichie de façon exponentielle au cours de la dernière décennie sur les deux premières applications, et c'est dans le cas de la troisième application que les GPS peuvent ouvrir de nouvelles opportunités, notamment du fait de leur forte évolution.

3. Evolution des GPS

Depuis la naissance des GPS, ceux-ci n'ont cessés d'évoluer avec notamment le premier GPS portable développé en 1989. La première tentative de validation et commercialisation d'un GPS pour mesurer l'activité physique revient à Garmin en 1997 (GPS45, Garmin) (Schutz & Chambaz, 1997). Un participant a parcouru des distances à dix-neuf allures de marche et vingt-deux de course à l'aide d'un métronome. Les données ont été comparées à un chronomètre Suisse. Bien que les résultats étaient prometteurs ($r = 0.99$ et $CV < 5\%$), le chronomètre Suisse ne pouvait pas être utilisé comme un outil de référence pour valider la mesure de vitesse avec GPS (Schutz & Chambaz, 1997). Puis en 2002, le GPS-315 (Mazellan Co. Ltd, San Dimas, USA) a été étudié pour mesurer les activités de locomotions dans les sports d'équipes (Ishii et coll., 2002). Cette étude avait pour objectif de mesurer la distance parcourue par les arbitres de football et de rugby pendant les matchs à l'aide de 3 systèmes différents (GPS, vidéo, traçage manuel). Les résultats ont montré que le GPS ne montrait pas de différences significatives pour par rapport à la vidéo ($P < 0.05$).

Le premier GPS commercialisé (GPSports Systems, SPI-10) pour l'analyse en sport collectif date de 2003 et sa validité a été mise en avant en 2006 pour la distance totale parcourue (surestimation systématique de 5%, très large corrélation, $r = 0.998$) avec une fréquence d'échantillonnage à 1 Hz (Edgecomb et Norton, 2006). Puis dans les années 2010, les premiers GPS avec une fréquence d'échantillonnage à 5 Hz font leur apparition (Coutts & Duffield, 2010 ; Jennings et coll., 2010 ; Duffield et coll., 2010). Puis très rapidement, les premiers GPS avec une fréquence d'échantillonnage à 10 Hz arrivent sur le marché (Castellano et coll., 2011 ; Varley et coll., 2012 ; Johnston et coll., 2014 ; Beato et coll., 2018a). Enfin quelques systèmes GPS à des fréquences d'échantillonnages entre 15 et 20 Hz (Johnston et coll., 2014 ; Hoppe et coll., 2018 ; Beato et coll., 2018b ; Lacome et coll., 2018) ont été développés.

Par ailleurs, les dernières générations de GPS (ou plus précisément GNSS) ont intégrées plusieurs systèmes satellites (i.e., plusieurs constellations, e.g., GPS, GLONASS, etc.). De plus, ils utilisent un système d'augmentation par satellite (SBAS) qui est une méthode d'amélioration des attributs du système de navigation (tels que la précision et la reproductibilité) grâce à l'intégration d'informations externes dans le processus de calcul.

Enfin, les évolutions concernent aussi la taille et le poids de l'unité GPS (e.g., 15,9 x 5,6 x 2,8 cm pour 431 g en 2002 avec le GPS-315 de Magellan ; 8,1 x 4,3 x 1,6 cm pour 53 g en 2020

avec le Vector S7 de Catapult) ou encore le niveau de batterie (plus de 5 heures aujourd'hui). Ce petit format s'explique par l'amélioration des composants, qui sont notamment plus petits et plus performants (e.g., processeur) et permet aux joueurs de le porter à l'entraînement ou match sans être gênés (**Figure 9**).

Ainsi, les GPS actuels ont largement évolués, que ce soit en termes de praticité ou en termes de précision.



Figure 9 : Deux des unités GPS les plus utilisés actuellement dans le football professionnel (clubs et fédérations) avec une fréquence d'échantillonnage à 10 Hz et la double constellation (GPS + GNSS). A gauche, le Vector S7 de Catapult et à droite, le Apex Pro Series Pod de STATSport.

4. Validité et reproductibilité des GPS actuels

La validité est mesurée à partir de la différence moyenne ou biais moyen (MD) et de l'erreur standard de l'estimation (TEE), standardisées et en pourcentage. Les mesures de validité ont été classées comme bonnes ($< 5\%$), modérées (5 à 10%) ou mauvaises ($> 10\%$) selon l'interprétation d'Hopkins (Hopkins et coll., 2009).

La reproductibilité est mesurée avec le coefficient de corrélation intraclasse (ICC), qui est interprété comme suit : $ICC \geq 0,9$ = excellent ; $0,9 > ICC \geq 0,8$ = bonne ; $0,8 > ICC \geq 0,7$ = acceptable ; $0,7 > ICC \geq 0,6$ = moyenne ; $0,6 > ICC \geq 0,5$ = médiocre ; $ICC < 0,5$ = faible

(Atkinson & Nevill, 1998). L'erreur type de mesure (TE) est calculée à l'aide de la formule suivante : $TE = SD \sqrt{(1-ICC)}$ (Atkinson & Nevill, 1998 ; Hopkins et coll., 2001) et est rapportée en tant que coefficient de variation (CV), qui a été considéré comme bon lorsque $< 5 \%$, modérée entre 5 et 10 % et mauvais $> 15 \%$. Les tailles d'effet (ES) ont été calculées selon le d de Cohen et interprétées selon l'échelle de Hopkins et coll. (Hopkins et coll., 2009).

Les précédentes études ont clairement observés que les unités GPS à 10 Hz et plus (e.g., 15, 18 ou 20 Hz) démontrent une précision bien supérieure par rapport aux unités à 1 et 5 Hz (Beato et coll., 2018a, 2018b ; Hoppe et coll., 2018 ; Johnston et coll., 2014) pour mesurer les déplacements ou la vitesse instantanée, notamment les GNSS (i.e., accès à plusieurs constellations). Cependant, il existe une grande variabilité dans la validité et la reproductibilité entre les marques et les modèles (Coutts et coll., 2010 ; Jennings et coll., 2014 ; Beato et coll., 2019 ; Thornton et coll., 2019). Aujourd'hui les principaux GNSS présents dans le football professionnel proviennent des marques STATSport (GNSS APEX à 10 Hz) et Catapult (GNSS Vector S7 à 10 Hz).

Les travaux de Beato et coll. (2018a) étudient la validité des deux derniers GPS de STATSports (unités Apex) pour mesurer, lors de courses maximales, les distances sur trois parcours (1, un tour piste d'athlétisme de 400 mètres ; 2, un circuit multidirectionnel spécifique de 128,5 mètres, i.e., avec des changements de direction à différents angle et des sprints ; 3, un sprint de 20 mètres) et la vitesse maximale (par rapport au radar comme critère de référence). Le premier système a accès uniquement au GPS et à une fréquence d'échantillonnage à 18 Hz, et le deuxième a accès à plusieurs GNSS (i.e., accès à plusieurs systèmes satellites, e.g., GLONASS, Galileo, etc.) et à une fréquence d'échantillonnage à 10 Hz. Concernant le GNSS, les résultats montrent respectivement pour les parcours 1, 2 et 3 une distance parcourue de $397,7 \pm 7,6$ m, $131,4 \pm 1,4$ m, $20,07 \pm 0,29$ m avec une erreur absolue de $4,19 \pm 3,48$, $2,85 \pm 1,4$ et de $0,22 \pm 0,20$ m et un biais de $1,05 \pm 0,87 \%$, $2,3 \pm 1,1 \%$ et $1,11 \pm 0,99 \%$. La V_{max} mesurée avec le GNSS est de $26,5 \pm 2,3$ km.h⁻¹ et avec le radar de $26,3 \pm 2,4$ km.h⁻¹. La différence moyenne (90% CI) est de $0,17$ (-0,18 ; 0,53) ($p = 0,32$; ES = 0,08 ; triviale). L'erreur absolue est de $0,62 \pm 0,45$ km.h⁻¹ et le biais de $2,3 \pm 1,67 \%$. Le coefficient de corrélation intraclasse (ICC) (90% CI) entre le GNSS et le radar est de $0,96$ (0,92, 0,98) ($p < 0,001$) i.e., presque parfait. Concernant le GPS, les résultats montrent respectivement pour les parcours 1, 2 et 3 une distance parcourue de $396,8 \pm 11,6$ m, $131,2 \pm 1,3$ m, $20,19 \pm 0,28$ m avec une erreur absolue de $4,7 \pm 2,28$, $2,7 \pm 1,4$ et de $0,23 \pm 0,25$ m et un biais de $1,17 \pm 0,73 \%$, $2,11 \pm 1,06 \%$ et $1,15$

$\pm 1,23 \%$. La $V_{\max}$ mesurée avec le GNSS est de $26,5 \pm 2,6 \text{ km.h}^{-1}$ et avec le radar de $26,3 \pm 2,4 \text{ km.h}^{-1}$. La différence moyenne (90% CI) est de 0,24 (-0,15 - 0,50) ($p = 0,064$; ES = 0,08 ; triviale). L'erreur absolue est de $0,52 \pm 0,30 \text{ km.h}^{-1}$ et le biais de $2,02 \pm 1,24 \%$. L'ICC (90% CI) entre le GNSS et le radar est de 0,98 (0,96 - 0,99) ($p < 0,001$) i.e., presque parfait. L'analyse entre les deux GPS n'a pas mis en avant de différences significatives sur les trois parcours ainsi que sur la vitesse maximale (respectivement $p = 0,522$, ES = 0,18 ; $p = 0,753$, ES = 0,11 ; $p = 0,463$, ES = 0,42 et $p = 0,691$; ES = 0,03).

La reproductibilité de l'unité GNSS de STATSport à 10 Hz a été étudié dans les travaux de Beato et De Keijzer (2019) par la vitesse maximale sur des portions d'un sprint (5 à 10 m, 10 à 15 m, 15 à 20 m, 20 à 30 m, 5 à 30 m). Les résultats présentés dans le **Tableau 12** montrent un excellent niveau (Atkinson & Nevill, 1998) ($CV < 5 \%$) de reproductibilité.

Tableau 12 : Reproductibilité de la vitesse maximale sur les sprints de 5, 10, 15, 20 et 30 mètres (d'après Beato et De Keijzer, 2020)

Vmax (m.s ⁻¹)	Sprint 1	Sprint 2	P valeur	ICC (95% CI)	Interprétation	TE (CV %)	Interprétation
5 – 10 m	5,33 ± 0,76	5,30 ± 0,76	0,162	0,96 (0,95, 0,97)	excellent	0,15 (2,91%)	bon
10 – 15 m	6,36 ± 0,62	6,35 ± 0,64	0,793	0,95 (0,94, 0,96)	excellent	0,14 (2,18%)	bon
15 – 20 m	7,00 ± 0,63	7,00 ± 0,62	0,998	0,95 (0,94, 0,96)	excellent	0,14 (2,01%)	bon
20 – 30 m	7,48 ± 0,71	7,46 ± 0,72	0,207	0,97 (0,96, 0,98)	excellent	0,12 (1,64%)	bon
5 – 30 m	6,48 ± 1,20	6,46 ± 1,20	0,130	0,99 (0,98, 0,99)	excellent	0,12 (1,85%)	bon

Roe et coll. (2017) ont mené une étude sur la validité du modèle S5 à 10 Hz de Catapult (Catapult Innovations, Melbourne, Australie) pour déterminer la vitesse maximale par rapport au radar (50 Hz). Le biais moyen s'est montré trivial (-0,8% [-1,1 à -0,4]), l'erreur standard de l'estimation petite (1,9 [1,7 à 2,2]) et la corrélation presque parfaite (0,95 [0,93 à 0,97]) avec un CV < 5 %. Ainsi le GPS s'est montré valide et reproductible pour déterminer la vitesse maximale. Hoppe et coll. (2018) ont étudié la validité et la reproductibilité sur le modèle S3 à 10 Hz et 18 Hz de Catapult pour les distances parcourues en sprint et la vitesse maximale. Les résultats mettent en avant une validité et reproductibilité légèrement plus élevée pour le GPS à 18 Hz (que ceux à 10 Hz sur les distances en sprint).

D'autres marques se sont aussi intéressées à l'étude de la validité et de la reproductibilité, que ce soit pour l'évaluation des distances à haute intensité et la vitesse (moyenne ou maximale). Par exemple, des travaux évaluant la reproductibilité interunités du GPS V2 de SensorEverywhere (Digital Simulation, France) échantillonnant à 16 Hz, ont démontré une différence triviale pour l'erreur type de mesure et une différence petite pour la vitesse maximale de sprint (CV : $0,5 \pm 0,1\%$, non filtré et filtré) et l'accélération maximale (CV : $6,4 \pm 1,1\%$ et $3,9 \pm 0,6\%$ non filtré, et filtré avec une moyenne mobile à de 0,5 secondes) respectivement (Lacome et coll. 2019). Concernant la validité, le biais moyen variait de $-3,0 \pm 1,1\%$ à $-1,6 \pm 1,0\%$ et l'erreur standard de $2,0 \pm 0,55$ à $1,6 \pm 0,4\%$ respectivement pour $V_{\max}$ et $V_{\max}$ filtré par rapport au dispositif radar (48 Hz). L'étude de Huggins et coll. (2020) s'intéresse à la validité et la reproductibilité des derniers GPS Team Units de Polar à une fréquence d'échantillonnage de 10 Hz à partir d'un sprint linéaire de 100 mètres (mesuré à 40 et 100 m) et d'un circuit multidirectionnel de 120 mètres. Concernant la distance parcourue en sprint, le biais moyen était de $-6,9\%$ (ES = 1,3), $-2,3\%$ (ES = 1,2) et $1,8\%$ (ES = 1,8) respectivement pour 40 m, 100 m et le circuit. Concernant la vitesse instantanée en sprint, le biais moyen était de $-1,2\%$ (ES = 0,2) et $5,3\%$ (ES = 1,0) pour 100 m et le circuit. La reproductibilité s'est avérée bonne à modérée dans toutes les conditions (CV < 5,2 %) (Huggins et coll., 2020). L'étude de Nagahara et coll. (2017) s'intéresse notamment à la validité du GPS gpexé échantillonné à 18 Hz pour la vitesse maximale sur des sprints supérieurs à 30 mètres par rapport au radar (50 Hz) et au laser (100 Hz). Les résultats mettent un avant une erreur triviale (MD < 1 %) et une bonne reproductibilité (CV < 5%).

Mais comme évoqué dans le paragraphe précédent, aujourd’hui les GPS sont des outils complètement différents. En effet, plusieurs fournisseurs proposent des GPS à une fréquence d’échantillonnage à 10 Hz et l’utilisation de la double constellation avec SBAS.

Le taux d’échantillonnage à lui seul n’améliore pas la qualité des données GPS, car d’autres facteurs tels que le processeur, les méthodes de filtrage et les algorithmes de traitement des données peuvent entrer en jeu. Une étude précédente a montré des améliorations significatives à la fois dans la précision du positionnement et dans la surveillance de l’intégrité grâce à l’utilisation d’un système à double constellation (Feng et coll., 2013).

Ainsi, les GPS actuels se montrent valides et reproductibles pour évaluer les courses à très haute intensité, ce qui ouvre un nouveau champ de possibilités quant à leur utilisation, notamment sur l’évaluation du profil F-v. Lacome et coll (2020) ont récemment montré une bonne reproductibilité entre les systèmes GPS (Apex, STATSports, Dublin, Ireland) pour l’évaluation du profil F-v.

5. Résumé

Les GPS ont fortement évolué ces 20 dernières années, et aujourd’hui l’ensemble des équipes professionnels les utilisent quotidiennement. Les GPS échantillonnant au moins à 10 Hz, qui plus est lorsqu’il s’agit de GNSS (i.e., accès à plusieurs constellations) sont valides et reproductibles pour mesurer les sprints ainsi que la vitesse maximale instantanée. Ainsi, le GPS présente beaucoup de potentiel, notamment concernant l’évaluation du profil F-v en sprint (Lacome et coll., 2020). La récolte permanente et massive des données GPS pendant l’activité offre de nouvelles opportunités pour évaluer les joueurs de football, et notamment la possibilité de concevoir de nouveaux modèles permettant de suivre les qualités physiques sans évaluation comme le profil A-S (Morin et coll., 2021).

Synthèse et problématiques

Le football est un sport dont l'accélération maximale (e.g., pour récupérer un ballon à 5 m) et la vitesse maximale (e.g., pour courir dans un espace et marquer un but) sont des facteurs clés de la performance. Le développement de la discipline (e.g., professionnalisme, cinq changements de joueurs, nouvelles technologies, etc.) a accentué l'importance de ces qualités (+ 50% de courses à haute intensité en moins de 10 ans) qui sont devenues indispensables dans le football moderne. Il apparaît donc évident de devoir évaluer les qualités neuromusculaires de manière précise et efficiente, et ce afin d'individualiser l'entraînement ou détecter des talents.

Le profil force-vitesse horizontal (Samozino et coll., 2016) est une méthode de terrain valide et reproductible qui permet de déterminer les relations force-vitesse ainsi que puissance-vitesse lors de la course à pied. Cependant, cette méthode nécessite des outils spécifiques pour collecter les données pendant l'évaluation et ceux-ci sont bien souvent trop coûteux (e.g., laser ou radar) ou chronophages pour l'ensemble d'une équipe (e.g., application smartphone). **Ainsi, les objectifs principaux de l'étude 1 sont d'évaluer la validité et la reproductibilité du profil F-v construit à partir de l'outil GPS, utilisé quotidiennement par les équipes professionnelles, ce qui permettrait de se prémunir d'outils supplémentaires pour récolter les données et automatiser leur traitement.** En effet, la revue de littérature a mis en avant une très forte amélioration de l'outil GPS, dont la fréquence d'acquisition et le système de double constellation ont permis d'augmenter considérablement la précision, ouvrant ainsi de nouvelles possibilités à l'utilisation des GPS, en particulier pour l'évaluation des qualités neuromusculaires.

En théorie, la méthode d'évaluation du profil F-v est assez simple puisqu'elle nécessite seulement que le joueur effectue un sprint maximal linéaire de 30 à 40 mètres. Mais en pratique, au vu des calendriers très congestionnés (Carling et coll., 2016 ; Julian et coll., 2021), le fait d'effectuer un effort maximal est problématique et rend très difficile l'évaluation régulière des qualités neuromusculaires. La revue de littérature a évoqué une très récente méthode développée par Morin et coll. (2021), qui, via la collecte des données GPS au quotidien, permet de déterminer la relation accélération-vitesse de manière invisible et dans un contexte écologique (*in-situ*). Ce concept novateur n'a jamais été évalué et la méthodologie pour établir

un profil reproductible définie. De ce fait, **les objectifs principaux de l'étude 2 sont d'étudier la reproductibilité du profil accélération-vitesse *in-situ* dans l'activité football en analysant l'effet du nombre et du type de séances incluses dans l'analyse.**

Bien que ce concept semble très prometteur et soit théoriquement très proche du profil F-v pour évaluer les qualités neuromusculaires, la validité de cette approche et le lien avec le profil F-v n'a pas encore été étudiée. Par conséquent, **les objectifs de l'étude 3 sont d'évaluer la validité concurrente du profil A-S par rapport aux variables du profil F-v et d'observer l'effet d'un programme d'entraînement sur les variables des profils A-S et F-v pour quantifier l'ampleur de l'association entre les variables des deux méthodes.**

Contributions personnelles

I. Etude 1. Validité et reproductibilité du GPS pour l'évaluation du profil force-vitesse en sprint chez les athlètes élités

Clavel, P., Leduc, C., Morin, J. B., Owen, C., Samozino, P., Peeters, A., Buchheit, M., & Lacome, M. (2022). Concurrent Validity and Reliability of Sprinting Force-Velocity Profile Assessed With GPS Devices in Elite Athletes. *International journal of sports physiology and performance*, 17(10), 1527–1531. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2021-0339>

Résumé

Les objectifs de cette étude étaient 1) d'évaluer la validité concurrente des systèmes de positionnement global (GPS) par rapport au système radar pour déterminer les profils force-vitesse (F-v) en sprint, et 2) d'évaluer la reproductibilité interunités des dispositifs GPS 10 Hz (Vector S7, Catapult Innovations, Melbourne, Australie). Seize joueurs de rugby U18 élite masculins (178.3 ± 7.6 cm ; 78.3 ± 13.2 kg) ont participé à l'étude. Deux sprints de 50 mètres, entrecoupés de 5 minutes de récupération, ont été effectués pour obtenir les variables en entrée (vitesse maximale de sprint [$V_{\max}$] et constante de temps d'accélération τ) et en sortie (force horizontale maximale théorique [F_0], vitesse de course maximale théorique [V_0] et puissance horizontale maximale [$P_{\max}$]) du profil F-v. La vitesse a été mesurée simultanément avec un radar et deux unités GPS placées en haut du dos des joueurs. Des analyses de validité concurrentes et de reproductibilité interunités ont été réalisées. Des corrélations modérées à presque parfaites ont été observées entre les variables F-v dérivées du radar et du GPS, avec des erreurs types petites à grandes. Des coefficients de variation triviaux à petits ont été trouvés concernant la reproductibilité interunités. Les dispositifs GPS testés dans cette étude représentent une alternative valide et reproductible au système radar pour l'évaluation des profils F-v en sprint chez les joueurs d'élite en sport collectif.

Mots-clés : sport collectif, force, puissance, course à pied, performance sportive

Abstract

The aims of this study were to 1) assess the concurrent validity of global positioning systems (GPS) against a radar device to measure sprinting force-velocity (F-v) profiles and 2) evaluate the inter-unit reliability of GPS devices. Sixteen male elite U18 rugby union players (178.3 ± 7.6 cm; 78.3 ± 13.2 kg) participated in this study. Two 50-m sprints interspersed with at least 5 min of recovery were used to obtain input (maximal sprint speed [MSS] and acceleration time constant τ) and output (theoretical maximal horizontal force [F_0], sprinting velocity [V_0], and horizontal power [$P_{\max}$]) F-v profile variables. Sprint running speed was concurrently measured with a radar and two GPS units placed on the upper back of the players. Moderate to nearly perfect correlations were observed between radar and GPS-derived F-v variables, with small-to-large typical errors. Trivial-to-small coefficients of variation were found regarding the GPS inter-unit reliability. The GPS devices tested in this study represent a valid and reliable alternative to a radar device when assessing sprint acceleration F-v profiles in team sports players.

Key words: team sport, force, power, running, sport performance

1. Introduction

Pour évaluer le profil force-vitesse (F-v) en sprint, les praticiens doivent établir des protocoles standardisés et enregistrer des données temporelles spécifiques en course à l'aide de dispositifs spécifiques tels que le radar (Haugen et coll., 2020). Bien que le radar soit considéré comme une mesure de référence pour évaluer la vitesse (Haugen et coll., 2020), tous les clubs de haut niveau n'ont pas accès à une telle technologie. De plus, dans les environnements professionnels, le temps est compté et il peut être difficile pour les praticiens de consacrer une séance d'évaluation complète pour évaluer les profils F-v (Lacome et coll., 2019). Cependant, la plupart des équipes d'élite sont désormais équipées de dispositifs de système de positionnement par satellites (GPS), ce qui pourrait représenter une alternative viable pour mesurer les données position-vitesse-temps des joueurs et calculer les profils F-v sans équipement supplémentaire ni logistique associée.

Des études récentes ont déjà mis en évidence la possibilité d'utiliser les données brutes à 10 Hz (i.e., provenant du GPS) pour extrapoler les propriétés mécaniques du sprint en analysant la validité par rapport au dispositif radar et laser (Nagahara et coll., 2017) ou aux cellules de vitesse (Hoppe et coll., 2018). Ils ont observé des résultats mitigés, probablement en raison de la précision limitée des unités GPS utilisées. De plus, Lacome et coll. (Lacome et coll., 2020) ont examiné la reproductibilité interunités et ont observé des erreurs typiques allant de négligeables à faibles et de bons à très bons coefficients de corrélation intra classe entre dispositifs GPS. Cela suggère que des praticiens pourraient évaluer de manière reproductible le profil F-v avec les GPS. Bien que des études aient été faites sur les variables en sortie (i.e., les variables du profil F-v), la validité et la reproductibilité des variables en entrée du modèle (caractéristiques des données vitesse-temps) restent inconnues. Enfin, il reste à déterminer si l'intégration d'un système à double constellation (i.e., GNSS et GPS) améliore la précision des GPS pour déterminer les variables du profil F-v.

Par conséquent, le premier objectif de cette étude était 1) d'évaluer la validité concurrente des variables d'entrée (vitesse maximale de sprint [MSS] et constante d'accélération τ) et des variables de sortie (force horizontale maximale théorique [F_0], vitesse de course maximale théorique [V_0], et puissance horizontale [$P_{\max}$]) obtenues avec le GPS et 2) d'évaluer la reproductibilité interunités des variables du profil F-v évaluées à l'aide des données GPS.

2. Méthode

Sujets

16 joueurs de rugby U18 élite (taille : $178,3 \pm 7,6$ cm ; poids : $78,3 \pm 13,2$ kg) ont été inclus dans l'étude dans le cadre d'un stage d'entraînement avec l'équipe de France. Les participants ont donné leur consentement avant le début de l'étude. L'approbation éthique a été accordée par le comité d'éthique de l'université de Leeds Beckett et était conforme aux recommandations de la déclaration d'Helsinki.

Conception

Le profil F-v a été évalué au début d'une séance d'entraînement de rugby sur un terrain en herbe naturel en plein air. Un échauffement de 20 minutes a été effectué, comprenant des exercices de course et deux sprints progressifs de 30 mètres. Après l'échauffement, deux sprints de 50 mètres avec 5 minutes de récupération entre chaque essai ont été réalisés. Aucun signal spécifique n'a été donné aux athlètes pour démarrer le sprint. Cependant, il leur a été demandé de rester immobiles afin d'éviter tout mouvement de recul avant de commencer leur sprint, et d'accélérer au maximum une fois qu'ils ont commencé. Chaque sprint a été mesuré simultanément avec un radar et deux GPS. Le radar (Stalker Pro II Sports Radar Gun, Plano, TX) a une fréquence d'échantillonnage de 46,875 Hz, été placé sur un trépied à 5 mètres derrière le joueur et à 1 mètre au-dessus du sol. Les unités GPS (Vector S7, Catapult Innovations, Melbourne, Australie) avaient une fréquence d'échantillonnage à 10 Hz et comprenaient un système à double constellation (i.e., GNSS and GPS). Les deux unités GPS ont été mis chacun dans une brassière ajustée de manière que les deux unités soient positionnées côte-à-côte à 5 cm d'écart autour de C7-T1. Le signal était considéré de bonne qualité (Malone et coll., 2017) avec une dilution horizontale moyenne de précision de $0,74 \pm 0,10$ et $15,5 \pm 1,5$ satellites.

Les données brutes récoltées via le radar (Firmware 2.0.7) et les GPS (Firmware 8.1.0) ont été téléchargées puis importées dans un script personnalisé qui permet de calculer automatiquement les profils F-v avec le logiciel R (R v4.0.2.R Foundation for Statistical Computing) sur la base de la méthode de calcul présentée et validée dans des études précédentes (Samozino et coll., 2016 ; Morin et coll., 2019). L'ensemble du script est expliqué schématiquement dans la **Figure 10**.

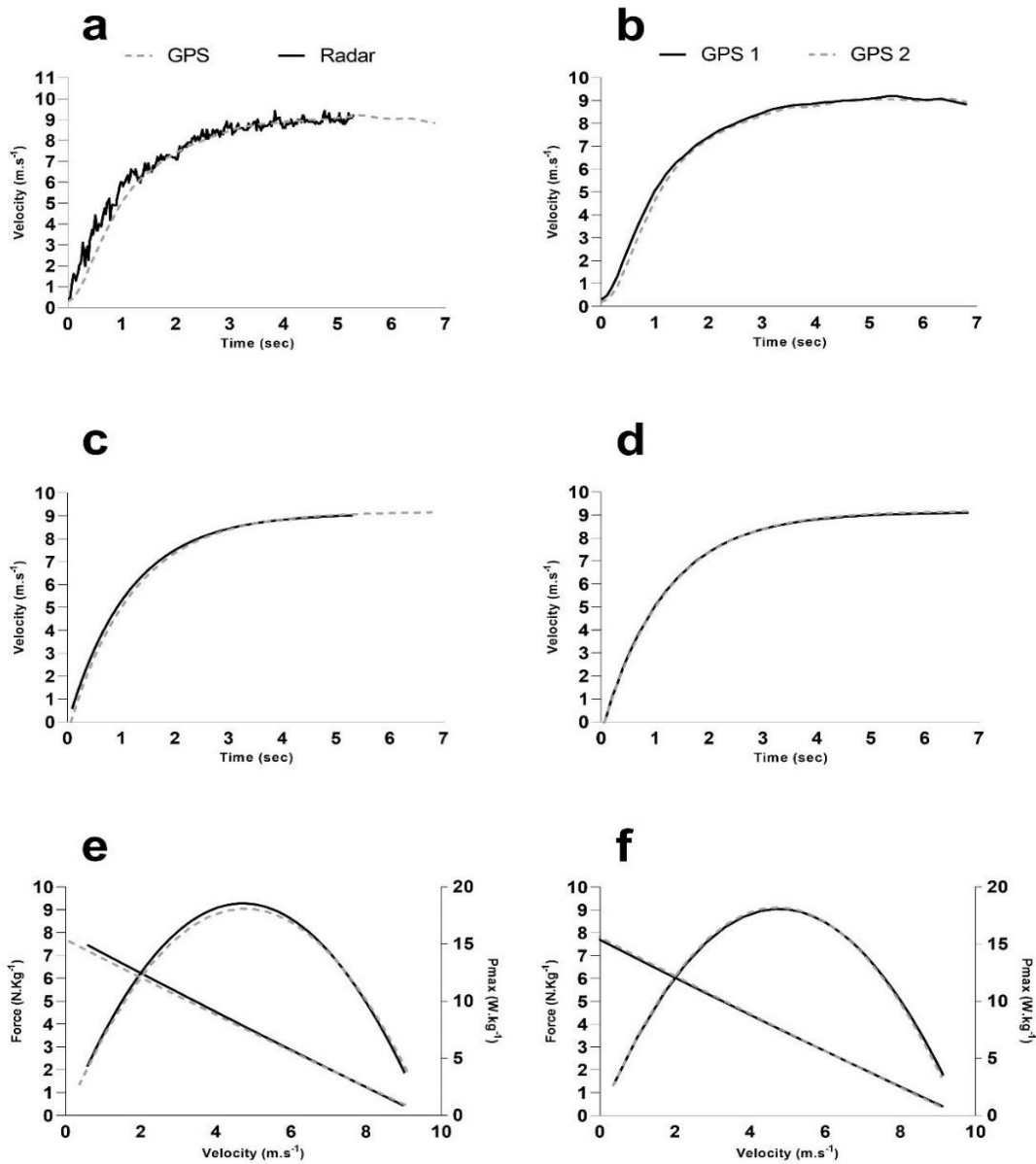


Figure 10 : Représentation schématique du traitement des données. Le panneau de gauche représente l'analyse de validité où le GPS a été comparé au radar, et celui de droite représente l'analyse de la reproductibilité interunités. Les deux partagent le même traitement des données via le script. Les figures a et b représentent l'identification du début et de la fin du sprint à partir du signal de vitesse brute. Le script identifie le début (i.e., la première valeur de vitesse $> 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ à partir de 0) et la fin du sprint (i.e., l'accélération négative après que le joueur ait atteint la vitesse maximale). Les figures c et d représentent l'ajustement des données de vitesse brute avec une équation mono-exponentielle à l'aide d'une méthode de régression des moindres carrés à partir de la fonction d'optimisation NLS de l'outil nlstools (version 3.6.2). Un délai (d) a été intégré dans l'équation initiale pour améliorer la qualité d'ajustement, si le départ effectif du sprint n'a pas eu lieu à $t=0\text{s}$ ($0,09 \pm 0,04 \text{ s}$ en moyenne dans la présente étude). Les figures e et f visaient à calculer les données de vitesse-temps, la force horizontale maximale théorique $F_0 \text{ [N.kg}^{-1}\text{]}$, la puissance de sprint horizontale maximale $P_{\text{max}} \text{ [W.kg}^{-1}\text{]}$ et la vitesse de sprint maximale théorique $V_0 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$.

Analyses statistiques

Toutes les données ont d'abord subies une transformation logarithmique afin de réduire le biais résultant d'une erreur de non-uniformité. Cependant, les valeurs présentées dans le texte et les figures sont les données retransformées. La validité concurrente a été évaluée à l'aide de la méthode de Bland-Altman, avec le biais moyen (CI à 90 %), l'erreur type de l'estimation (TEE, CI à 90 %) à la fois en pourcentage et en unité standardisées, et les coefficients de corrélation de Pearson. La magnitude du biais moyen standardisé, du TEE et des corrélations ont été interprétées selon les propositions de Hopkins (Hopkins et coll., 2004).

La reproductibilité interunités du profil F-v mesuré par le GPS a été évalué avec l'erreur typique de mesure exprimée sous la forme du coefficient de variation (CV, IC à 90 %) ainsi qu'en unités standardisées et en corrélation intraclasse (ICC). De plus, le plus petit changement significatif ($0,2 \times \text{SD}$ inter-athlètes) (SWC) a été calculé. La sensibilité (rapport signal/bruit) a été classée comme suit : bonne ($\text{CV} < \text{SWC}$), OK ($\text{CV} = \text{SWC}$) ou mauvaise ($\text{CV} > \text{SWC}$) (Hopkins et coll., 2004).

3. Résultats

Les données relatives à l'analyse de la validité concurrente et à la reproductibilité interunités sont présentées dans le **Tableau 13**. Les limites (« *limits of agreement* ») de l'analyse de Bland-Altman sont présentées dans la **Figure 11**. La corrélation de Pearson a révélé une relation modérée pour F_0 ($r = 0,48$ [IC = 0,29 à 0,62]), large pour τ (0,56 [0,40 à 0,69]), très large pour $P_{\max}$ (0,74 [0,62 à 0,82]) et presque parfaite pour $V_{\max}$ (0,96 [0,94 à 0,97] ainsi que V_0 (0,94 [0,91 à 0,96]).

Tableau 13 : Analyse de la validité concurrente du GPS et de la reproductibilité interunités.

	$V_{\max}$ (m·s ⁻¹)	τ (s)	$P_{\max}$ (W·kg ⁻¹)	V_0 (m·s ⁻¹)	F_0 (N·kg ⁻¹)
Validité					
Radar	8,84 ± 1,06	1,24 ± 1,14	16,7 ± 1,12	9,26 ± 1,06	6,98 ± 1,11
GPS	8,81 ± 1,05	1,25 ± 1,08	16,08 ± 1,10	9,23 ± 1,06	6,96 ± 1,07
Biais moyen	-0,28	0,51	-0,56	-0,27	-0,19
(%)	(-0,63 to 0,07)	(-1,85 to 2,93)	(-2,25 to 1,17)	(-0,73 to 0,20)	(-2,33 to 1,99)
Biais moyen standardisé	-0,05	0,04	-0,05	-0,04	-0,02
	(-0,11 to 0,01)	(-0,15 to 0,23)	(-0,20 to 0,10)	(-0,12 to 0,03)	(-0,22 to 0,18)
TEE en CV (%)	1,7	11,30	7,99	2,16	10,12
	(1,4 to 2,0)	(9,77 to 13,45)	(6,92 to 9,48)	(1,88 to 2,55)	(8,76 to 12,04)
TEE standardisé	0,29	1,48	0,92	0,36	1,85
	(0,24 to 0,37)	(1,05 to 2,32)	(0,70 to 1,26)	(0,29 to 0,46)	(1,25 to 3,25)
Reproductibilité					
GPS 1	8,81 ± 1,06	1,25 ± 1,08	16,02 ± 1,10	9,24 ± 1,06	6,93 ± 1,07
GPS 2	8,81 ± 1,05	1,25 ± 1,07	16,14 ± 1,11	9,23 ± 1,05	6,99 ± 1,07
TE en CV (%)	0,5	2,0	1,4	0,6	1,8
	(0,4 to 0,7)	(1,7 to 2,6)	(1,2 to 1,8)	(0,5 to 0,8)	(1,5 to 2,4)
TE standardisé	0,10	0,28	0,15	0,12	0,28
	(0,08 to 0,12)	(0,23 to 0,36)	(0,12 to 0,18)	(0,10 to 0,15)	(0,23 to 0,35)
ICC (90% CI)	0,99	0,93	0,98	0,99	0,93
	(0,98 to 1,00)	(0,88 to 0,96)	(0,96 to 0,99)	(0,98 to 1,00)	(0,88 to 0,96)
SWC (%)	1,0	1,5	2,0	1,1	1,4
Sensibilité	Bonne	Pauvre	Bonne	Bonne	Pauvre

Les données brutes sont présentées sous la forme de la moyenne ± SD. Les statistiques de validité et de reproductibilité sont présentées avec des intervalles de confiance à 90 %. TEE, erreur standard de l'estimation ; TE, erreur type ; SWC, plus petit changement détectable. ; F_0 : force horizontale maximale théorique ; $P_{\max}$: puissance maximale de sprint horizontal ; V_0 : vitesse de sprint maximale théorique. $V_{\max}$, vitesse maximale

atteinte; τ est la constante d'accélération ; d , le temps de délai ; CV, coefficient de variation ; ICC, coefficient de corrélation intraclasse.

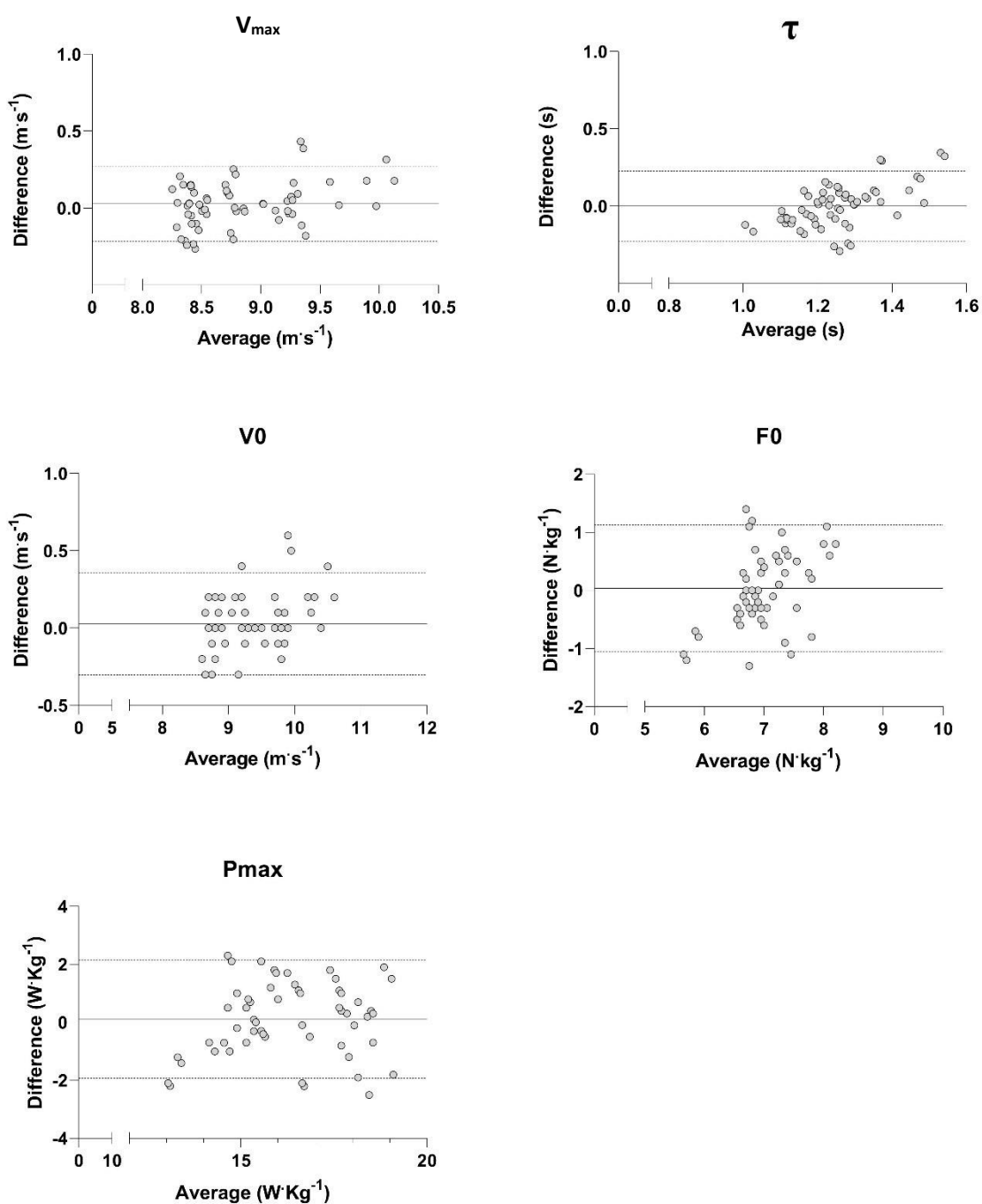


Figure 11 : Analyses de Bland-Altman. La ligne noire représente le biais. Les lignes en pointillées représentent les limites (« limits of agreement ») à 90%.

4. Discussion

Les principaux résultats de cette étude ont montré que le GPS pouvait être considéré comme un système valide et reproductible pour évaluer les variables du profil F-v. Ces résultats sont prometteurs et pourraient ouvrir de nouvelles possibilités en termes d'évaluation des qualités neuromusculaires des joueurs.

Les résultats actuels ont montré une corrélation modérée à presque parfaite et une erreur type faible à modérée entre les systèmes GPS et radar concernant les variables liées au profil F-v (F_0 , V_0 , $P_{\max}$), ce qui était similaire à l'étude de Nagahara et coll. (2017). Cependant, un système de 10 Hz comprenant un système de double constellation a été utilisée dans notre étude, comparée à celle de Nagahara et coll. (2017) qui ont utilisé des unités GPS à 20 Hz (d'une marque différente) avec une seule constellation. Une étude précédente a montré des améliorations significatives tant pour la précision du positionnement que pour le suivi grâce à l'utilisation d'un système à double constellation (Feng et coll., 2013). De plus, notre étude a été réalisée sur un terrain en plein air (i.e., sans structure métallique environnante), ce qui suggère que la technologie GPS actuelle, combinée à des conditions environnementales optimales est suffisamment précise pour surveiller les profils F-v.

Cependant, une validité concurrente plus faible (corrélation grande à très grande et erreur type modérée) a été observée pour $P_{\max}$ et F_0 par rapport à V_0 (corrélation presque parfaite et erreur type faible). L'origine de cette différence est incertaine et pourrait être attribuée à la fréquence d'échantillonnage ~ 5 fois inférieure du GPS par rapport au radar, ou à la précision du signal instantané. Dans d'autres recherches, Nagahara et coll. (2017) ont montré que la précision du GPS pour mesurer les profils F-v était plus faible lorsque l'on utilisait un GPS de 5 Hz par rapport à 20 Hz. Ainsi, avec l'inclusion d'un système à double constellation, le biais observé était similaire malgré une fréquence d'échantillonnage plus faible. Par conséquent, l'intégration de systèmes GPS avec une fréquence d'échantillonnage plus élevée est probablement nécessaire pour améliorer la validité des profils F-v mesurés avec les GPS. De plus, tandis que V_0 est calculé à partir de $V_{\max}$ (correspondant à un état stable), F_0 est principalement lié à τ qui est associé à un changement d'état. Par conséquent, F_0 pourrait être plus affecté par le système de mesure et le traitement des données, ce qui explique l'erreur type plus élevée par rapport à V_0 (Varley et coll., 2011). Ainsi, la validité du profil F-v (et en particulier F_0) à partir des données GPS, l'utilisation des GPS pour évaluer les profils F-v est désormais adaptée et pourrait être

prise en compte par les professionnels dans leur pratique quotidienne étant donné que le système à double constellation est courant.

Les résultats de l'étude ont mis en évidence que la reproductibilité interunités du GPS était très élevée lors de l'analyse des données liées au profil F-v. Des résultats similaires ont été observés par Lacome et coll. (2021) qui ont signalé des erreurs types faibles, soutenant que le GPS est une méthode reproductible pour surveiller les profils F-v. Bien qu'une sensibilité plus faible ait été observée pour F_0 , celle-ci pourrait être améliorée en utilisant davantage de répétitions de tests (l'erreur diminuant d'un facteur $\sqrt{n}$ répétitions (Taylor et coll., 2023)), ce qui serait plus réalisable en utilisant des GPS dans la pratique (e.g., 4 à 6 sprints pendant l'échauffement). Étant donné que seule la reproductibilité interunités a été mesurée dans cette étude, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour comprendre la reproductibilité intra-unité, la variabilité entre les semaines et la sensibilité aux changements (e.g., avant et après la présaison) du profil F-v obtenu avec le GPS.

5. Applications pratiques

- Les variables du profil F-v évaluées à l'aide du GPS Catapult Vector S7 (échantillonné à 10 Hz et doté d'un système de double constellation) ont présenté une erreur faible à modérée par rapport au radar. Les professionnels pourraient considérer les GPS comme une alternative valide pour une évaluation plus fréquente.
- Les variables du profil F-v obtenues avec le GPS ont montré une reproductibilité interunités élevées, confirmant les résultats d'études antérieures selon lesquelles les unités GPS peuvent être utilisées de manière interchangeable pour mesurer les profils F-v chez les athlètes de sports d'équipe.

6. Conclusion

La présente étude indique que le GPS Catapult Vector S7 est une alternative valide, reproductible et rapide au radar lors de l'évaluation des profils F-v en sprint chez les joueurs élite de sport collectif. Les études futures devront comparer les variables liées au profil F-v avec l'outil de référence (i.e., des pistes équipées de plateformes de force) ou envisager d'autres systèmes de référence avec une

fréquence d'échantillonnage plus élevée que les radar (e.g., laser, transducteur de position linéaire, etc.).

II. Etude 2. Reproductibilité du profil accélération-vitesse *in-situ* chez les jeunes footballeurs élités

Clavel, P., Leduc, C., Morin, J. B., Buchheit, M., & Lacome, M. (2023). Reliability of individual acceleration-speed profile in-situ in elite youth soccer players. *Journal of biomechanics*, 153, 111602. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2023.111602>

Résumé

Les objectifs de cette étude étaient d'évaluer la reproductibilité hebdomadaire du profil A-S en fonction du nombre et du contenu (sprints standardisés) de séances incluses. Dix-huit joueurs de football élite U19 ($179,4 \pm 7,1$ cm ; $69,0 \pm 9,5$ kg) ont participé à l'étude. Les données GPS ont été recueillies pendant trois semaines consécutives et ont été utilisées pour construire le profil A-S (accélération maximale théorique [A_0], vitesse maximale théorique [S_0] et pente de l'accélération-vitesse [AS_{pente}]) en fonction de multiples combinaisons de séances chaque semaine. Le nombre et le contenu des séances ont principalement affecté S_0 , tandis que A_0 est resté plutôt stable. La reproductibilité du profil A-S est davantage liée à la dispersion des points qu'à un nombre spécifique de séances (et donc de points) et a été améliorée lorsqu'un pourcentage élevé de la vitesse maximale (i.e., ≥ 95 %) a été atteint. Cette étude a montré une faible variabilité d'une semaine à l'autre pour A_0 , S_0 et AS_{pente} . Les praticiens doivent s'assurer que les valeurs couvrent une plage suffisante de données brutes [20-95 % de la vitesse maximale] pour construire une régression linéaire claire et cohérente, et ainsi extrapoler des valeurs significatives du profil A-S.

Mots clés : évaluation, course, sprint, GPS

Abstract

The aims of this study were to describe differences in the acceleration-speed (A-S) profile *in-situ* and to assess the week-to-week reliability of the A-S profile *in-situ* over a given training cycle of elite youth soccer players, in relation to the number of sessions included and analyse the effect of the inclusion or not of a specific sprint session. In this retrospective study, 18 male elite U19 football players (179.4 ± 7.1 cm; 69.0 ± 9.5 kg) participated. GPS data collected from three consecutive typical training weeks were used to calculate different combinations of A-S profile *in-situ* variables (theoretical maximal acceleration [A_0], theoretical maximal speed [S_0] and the slope of the acceleration-speed [AS_{slope}]). The number (and content) of sessions affected mainly S_0 while A_0 remained similar with or without a sprint session. The reliability of the A-S profile *in-situ* is more related to the spread of points rather than a specific number of sessions (and thus points) and was improved when a high percentage of maximum speed (i.e. $\geq 95\%$) was reached. The present study showed low week-to-week variability for A_0 , S_0 and AS_{slope} . However, practitioners need to make sure that the values cover a sufficient range of raw data [20-95% of maximum speed] to build a clear and consistent linear regression, and in turn extrapolate meaningful A-S profile values.

Key words: test, running, sprint, GPS

1. Introduction

Le sprint et l'accélération sont des déterminants physiques majeurs de la performance dans les sports d'équipe (Haugen et coll., 2014). Le suivi des qualités individuelles d'accélération en sprint des joueurs de football peut ainsi aider les entraîneurs à adapter les contenus d'entraînement au niveau individuel et à évaluer l'effet de différents programmes d'entraînement de manière non invasive (Hader et coll., 2019).

Le profil force-vitesse (F-v) en sprint est la pratique courante pour surveiller ces variables mécaniques (Samozino et coll., 2016, Morin et coll., 2019). Il fournit des données complètes et significatives sur les propriétés mécaniques et permet de déterminer précisément les capacités maximales des joueurs à produire de la force (F_0), de la vitesse (V_0) et de la puissance ($P_{\max}$). De nos jours, les dispositifs GPS représentent une alternative valable et reproductible pour mesurer les données de position-vitesse-temps des joueurs et calculer les profils F-v sans équipement supplémentaire et temps supplémentaire associé (Lacome et coll., 2020 ; Clavel et coll., 2022).

Des recherches récentes menées par Morin et coll. (2021) ont proposé le concept de profil accélération-vitesse *in-situ* (A-S) où les données recueillies lors des séances d'entraînements quotidiennes, sans évaluation supplémentaire, soient suffisantes pour extrapoler des informations similaires sur les propriétés mécaniques.

L'idée sous-jacente est que toutes les données collectées lors des séances d'entraînements quotidiennes soient utilisées pour construire une relation linéaire entre la vitesse (axe X) et l'accélération (axe Y) pendant une activité sportive spécifique (e.g., un entraînement, un match). Ce concept est similaire au profil F-V en sprint unique où la vitesse (i.e., l'axe X) et la force (i.e., l'axe Y) sont utilisées. Morin et coll. (2021) ont étudié ce concept sur la base de deux périodes de deux semaines de données d'entraînement cumulées. Dans cette étude, des valeurs typiques ont été trouvées aussi proches que celles reportées chez les joueurs de football professionnels masculins (Jiménez-Reyes et coll., 2018, 2022 ; Haugen et coll., 2019, 2020) en ce qui concerne S_0 (9 à 10 m.s^{-1}) vs V_0 (9,2 à 9,3 m.s^{-1}) et en ce qui concerne A_0 (7,2 à 7,7 m.s^{-2}) vs F_0 (7,1 à 9 N.kg^{-1}). Des études récentes (Alonso-Callejo et coll., 2022 ; López-Sagarra et coll., 2022) menées chez des footballeurs élite ont suivi la méthode introduite par Morin et coll. (2021) et ont trouvé des résultats similaires. A_0 varie de 5,7 à 8,7 m.s^{-2} et S_0 varie de 5,7 à 9,5

m.s^{-1} en fonction du poste et des jours du microcycle (Alonso-Callejo et coll., 2022) et la moyenne de la saison de l'équipe pour A_0 est de $6,20 \pm 0,51 \text{ m.s}^{-2}$ et pour S_0 est de $9,18 \pm 0,58 \text{ m.s}^{-1}$ (López-Sagarra et coll., 2022).

Une condition méthodologique important à l'utilisation de ce concept est de vérifier une bonne densité de points sur l'ensemble du spectre de vitesse et d'accélération (i.e., une accélération sous-maximale autour d'un seuil de vitesse de 3 m.s^{-1} jusqu'aux points de vitesse maximale) afin d'obtenir une régression linéaire cohérente (nombre élevé de points et R^2 élevé). Cependant, au-delà de ces critères initiaux, très peu de choses sont connues concernant la construction du profil, en particulier le nombre de points minimum en entrée, de séances à inclure, et la plage de points nécessaires pour obtenir un profil significatif et reproductible. Par conséquent, une meilleure compréhension de l'influence de l'organisation des données d'entrée sur la variabilité du profil A-S permettrait aux praticiens de prendre de meilleures décisions et de distinguer le bruit du véritable changement dans les capacités de vitesse et d'accélération des joueurs. En fin de compte, cela permettrait de suivre de manière cohérente ce profil mécanique individuel sans aucun test supplémentaire.

Par conséquent, les objectifs de cette étude étaient de décrire les différences dans le profil A-S et d'évaluer la reproductibilité hebdomadaire au cours d'un cycle d'entraînement chez des footballeurs élite en fonction du nombre de séances incluses, tout en analysant l'effet de l'inclusion d'une séance de sprint spécifique.

2. Méthode

Sujets

Vingt-neuf joueurs de football masculins U19 issus d'une académie professionnelle française ont initialement participé à cette étude. Les gardiens de but ont été exclus de l'étude, car ils suivaient un entraînement distinct. Finalement, 18 joueurs ont terminé l'étude (âge : $17,8 \pm 0,94$ ans, masse corporelle : $69,0 \pm 9,5 \text{ kg}$, taille : $179,4 \pm 7,1 \text{ cm}$). L'étude a été approuvée par le comité d'éthique du club. Les participants ont donné leur consentement éclairé avant de commencer l'étude et ils ont donné leur consentement éclairé conformément à la Déclaration d'Helsinki.

Conception

Une analyse rétrospective a été utilisée, avec des données collectées pendant trois semaines d'entraînement consécutives standards (novembre 2020). Les athlètes ont suivi le plan d'entraînement régulier conçu par le personnel technique (**Figure 12**).

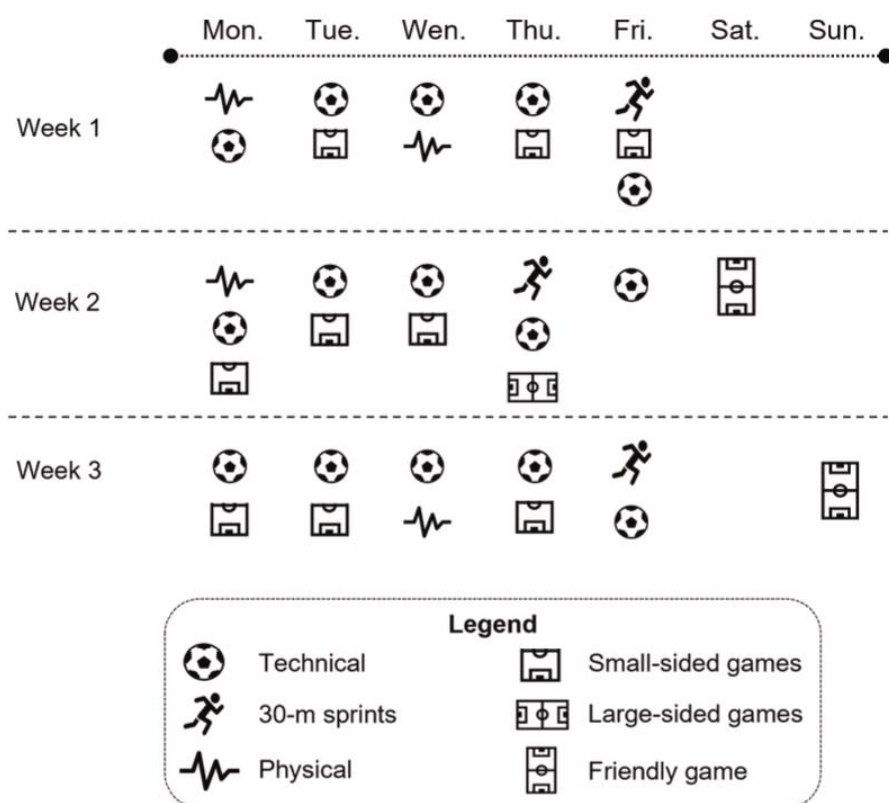


Figure 12 : Représentation schématique de trois semaines du plan d'entraînement régulier conçu par le staff technique et performance. Chaque semaine était composée de 5 à 6 séances, incluant une séance de sprint spécifique (deux sprints de 30 m). Les séances étaient composées d'exercices techniques, physiques et tactiques (e.g., jeux réduits ou grand jeux). Les données GPS ont été collectées pour chaque séance.

Chaque semaine d'entraînement était composée de $5,2 \pm 0,3$ séances de football et d'une séance de musculation. Les séances d'entraînement de football étaient un mélange de travail technique, de travail athlétique (course de box à box, sprint) et tactiques (jeux réduits et grands jeux). Les jeux réduits étaient joués de 4 contre 4 (20×20 m) jusqu'à 9 contre 9 + 2 gardiens de but (Gks) (68×52 m) avec un ratio de terrain par joueur inférieur à 250 m^2 , tandis que les grands jeux

étaient joués de 7 contre 7 + 2 Gks (68 × 52 m) jusqu'à 9 contre 9 + 2 Gks (68 × 68 m) avec un ratio par joueur supérieur à 250 m². En outre, une opposition interne (11 contre 11) sur un terrain de 104 × 68 m pendant 2 fois 40 minutes a été faite pour reproduire les exigences du match.

Aucun match officiel n'a été inclus dans l'analyse en raison de la pandémie de COVID-19. Une fois par semaine, tous les joueurs ont effectué deux sprints maximaux de 30 m au début de séance. Les séances d'entraînement se sont déroulées sur un terrain en plein air naturel et les données GPS ont été récoltées pour chaque athlète à l'aide d'un GPS 10 Hz (APEX, STATSports, Irlande du Nord). Chaque GPS était placé dans une brassière bien ajusté pendant les séances. Il a été activé 15 minutes avant l'échauffement pour assurer une bonne qualité de signal. La dilution horizontale de la précision du signal et le nombre de satellites par séance étaient respectivement de $1,0 \pm 0,2$ et $19,7 \pm 0,8$, ce qui caractérise une bonne qualité de signal (Malone et coll., 2017).

Profil accélération-vitesse *in-situ*

La méthode de calcul du profil A-S a été décrite par Morin et coll. (2021) et est illustrée dans la **Figure 13**. Toutes les données ont été traitées avec le logiciel statistique R (R v4.0.2. R Foundation for Statistical Computing).

Les dispositifs GPS ont récolté des données brutes de vitesse et de temps pour chaque séance (**Figure 13A**). La première étape a consisté à filtrer les données brutes de vitesse à l'aide d'un filtre récursif personnalisé. Pour filtrer le signal, un filtre Butterworth passe bas de second ordre à une fréquence de coupure de 1 Hz et une fréquence d'échantillonnage de 10 Hz a été utilisé. Cependant, il convient toutefois d'être prudent dans le filtre a utilisé car la fréquence d'échantillonnage et la fréquence de coupure dépendent du GPS et doivent être réévaluées pour d'autres fabricants ou modèles. Ensuite, l'accélération a été calculée comme le taux de variation de la vitesse filtrée (**Figure 13B**). Selon Blazeovich (2017), le terme "accélération" sera utilisé comme le changement de vitesse sur un changement de temps donné (Δ vitesse / Δ temps) afin de simplifier la lecture tout au long du manuscrit. Enfin, le nuage de points présenté à la **Figure 13C** est construit à partir des données de vitesse filtrée et de l'accélération positive (dérivée de la vitesse). Un seuil de vitesse de 3 m.s⁻¹ a été choisi par Morin et coll. (2021) car la vitesse du centre de masse augmente rapidement à 3 m.s⁻¹ au cours de la première étape d'une accélération de sprint, et cette vitesse correspond généralement à l'apparition de valeurs d'accélération maximales dans cette population (Morin et coll., 2019 ; Nagahara et coll., 2014). Une première

régression linéaire a été ajustée à partir des deux valeurs maximales d'accélération pour chaque sous-intervalle de 0,2 à partir de 3 m.s⁻¹ jusqu'à la vitesse maximale (**Figure 13D**). Ensuite, pour améliorer la précision globale du modèle, les résultats de cette première régression ont été analysés et tous les points qui ne sont pas dans l'intervalle de confiance à 95 % ont été enlevés. Enfin, une deuxième et dernière régression linéaire a été ajustée sans ces points aberrants (**Figure 13E**) et cette régression est utilisée pour délimiter le profil A-S individuel. Cette régression linéaire a permis d'extrapoler trois variables principales : A₀ (accélération maximale théorique) et S₀ (vitesse maximale théorique) comme étant les intercepts de la régression linéaire et respectivement de l'axe y et x et AS_{pente} (pente de la régression linéaire) calculé comme suit : $AS_{pente} = -A_0 / S_0$. Ces variables caractérisent le profil A-S du joueur individuel.

Traitement des données

Pour évaluer le profil A-S en fonction du nombre de sessions incluses dans le modèle (1, 2, 3, 4 ou 5 sessions) et limiter l'effet potentiel du contenu des sessions (en cas de sélection aléatoire des sessions), nous avons dû évaluer toutes les combinaisons de séances possibles. Par exemple, il y avait cinq combinaisons d'une session dans une semaine de cinq sessions, tandis qu'il y avait une combinaison de cinq sessions dans une semaine de cinq sessions (**Figure 15**). Pour chaque combinaison, les variables dérivées du profil A-S (A₀, S₀ et AS_{pente}) ont été calculées (**Figure 15**). En outre, le nombre de points utilisés pour construire la régression linéaire et le pourcentage de la vitesse maximale atteinte (% V_{max}) ont été extraits. La V_{max} a été déterminée comme étant la vitesse maximale atteinte par le joueur au cours des séances d'entraînement ou des matches au cours des 18 derniers mois. La précision de V_{max} a été vérifiée avec les trois meilleures performances (Buchheit et coll., 2021). La moyenne de chaque combinaison pour une période donnée (i.e., 1, 2, 3, 4 ou 5 jours) a été utilisée pour l'analyse. Le même processus a été utilisé pour créer un profil A-S avec différentes combinaisons, mais sans inclure de séances de sprint spécifiques afin d'éviter tout biais induit par le sprint linéaire dans l'analyse.

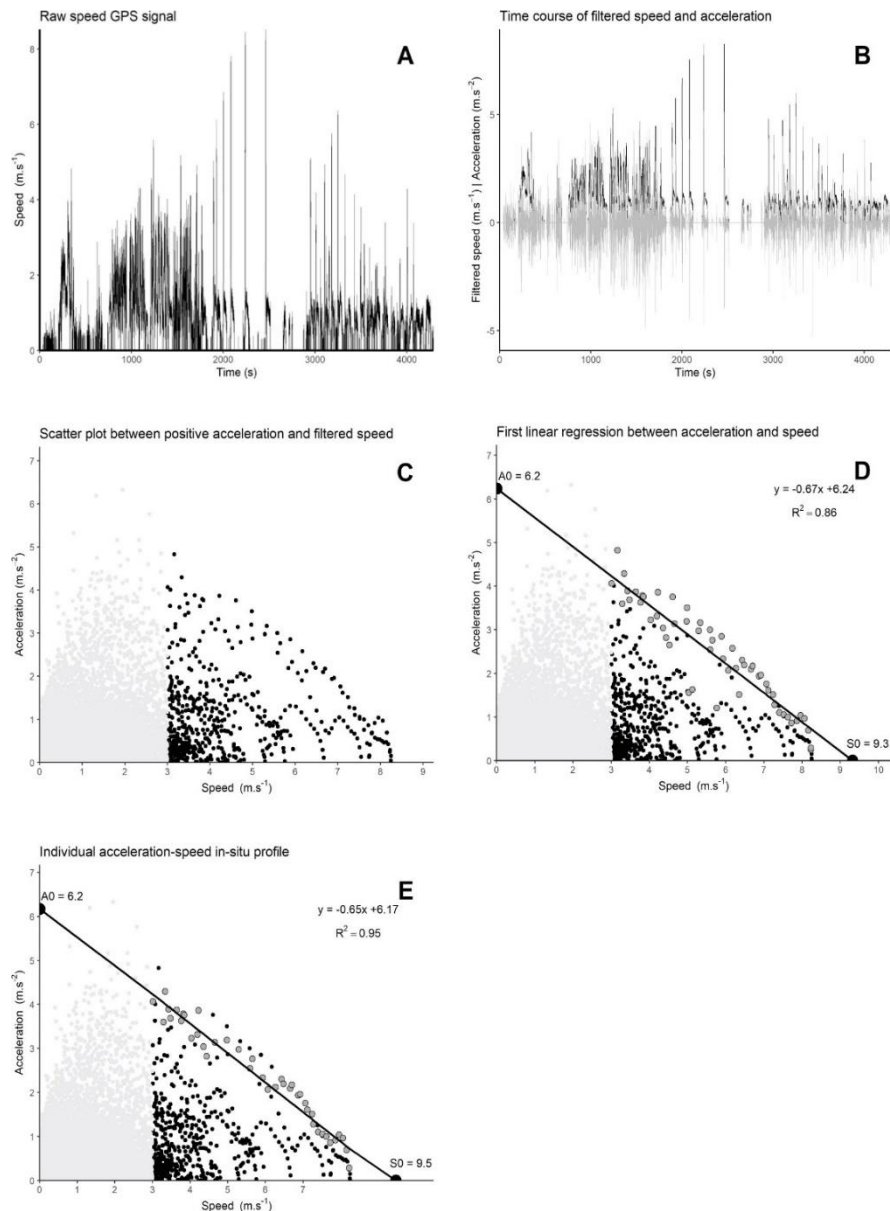


Figure 13 : Méthodologie étape par étape pour construire un profil accélération-vitesse in-situ (A-S) à partir des données GPS d'une séance d'entraînement comprenant deux sprints de 30 m chez un joueur de football d'élite. **A.** Évolution temporelle de la vitesse brute (m.s^{-1}) fournie par le dispositif GPS. **B.** Évolution temporelle de la vitesse filtrée (m.s^{-1}) en noir et évolution temporelle de l'accélération (m.s^{-2}) en gris. La vitesse filtrée a été calculée à partir d'un filtre récursif et l'accélération a été déterminée comme le taux de variation de la vitesse filtrée. **C.** Nuage de points montrant la relation entre les données de vitesse filtrée (axe X) et les données d'accélération positive (axe Y). Les points en dessous du seuil de 3 m.s^{-1} ont été grisés pour plus de clarté. **D.** Nuage de points montrant la relation entre les données de vitesse filtrées et les données d'accélération positive (axe Y). Première régression linéaire (ligne noire) ajustée à partir des deux valeurs maximales (points gris) de l'accélération pour chaque sous-intervalle de 0,2 à partir de 3 m.s^{-1} à la vitesse maximale individuelle. **E.** Exemple d'un profil individuel A-S.. La ligne représente le profil linéaire à partir duquel l'accélération maximale théorique ($A_0 = 6,2 \text{ m.s}^{-2}$) et la vitesse maximale théorique ($S_0 = 9,5 \text{ m.s}^{-1}$) ont été déterminées.

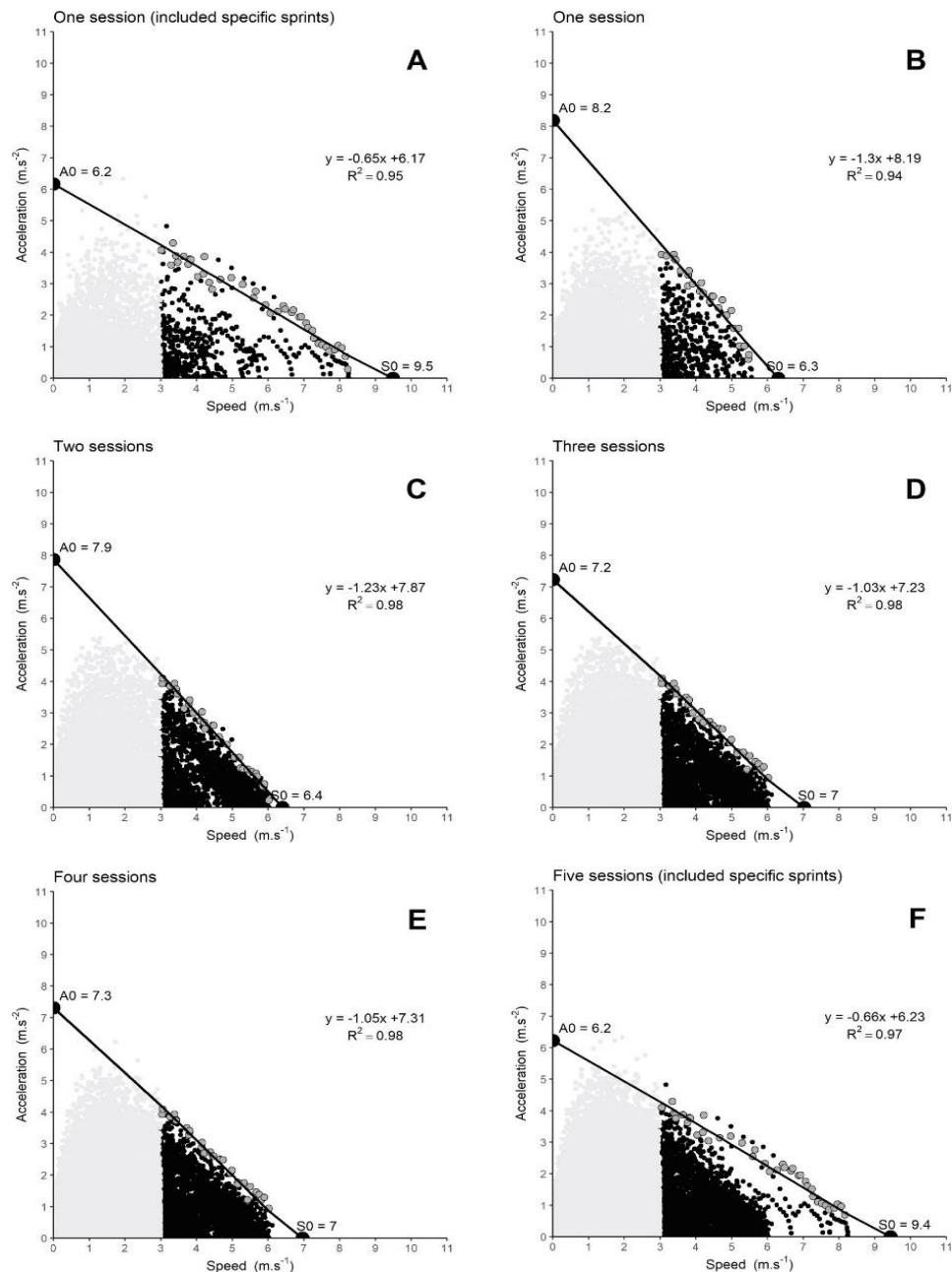


Figure 14 : Exemple d'un profil individuel accélération-vitesse (A-S) in-situ obtenu à partir des données de différents nombres et contenus de séances chez un jeune joueur de football élite. La ligne représente le profil linéaire à partir duquel l'accélération maximale théorique (A_0) et la vitesse maximale théorique (S_0) ont été déterminées. Les points gris les plus larges sont les points utilisés pour construire la régression linéaire. Les points inférieurs au seuil de 3 m.s^{-1} ont été grisés pour plus de clarté. **A.** Profil individuel A-S in-situ sur la base d'une séance de sprint spécifique avec deux sprints de 30 m ($A_0 = 9,5 \text{ m.s}^{-2}$ et $S_0 = 6,2 \text{ m.s}^{-1}$). **B.** Profil individuel A-S in-situ basé sur une séance d'entraînement de football aléatoire sans exercice de sprint spécifiques ($A_0 = 8,2 \text{ m.s}^{-2}$ et $S_0 = 6,3 \text{ m.s}^{-1}$). **C.** Profil individuel A-S in-situ basé sur deux séances d'entraînement de football aléatoire sans exercice de sprint spécifiques ($A_0 = 7,9 \text{ m.s}^{-2}$ et $S_0 = 6,4 \text{ m.s}^{-1}$). **D.** Profil individuel A-S in-situ basé sur trois séances d'entraînement de football aléatoire sans exercice de sprint spécifiques ($A_0 = 7,2 \text{ m.s}^{-2}$ et $S_0 = 7,0 \text{ m.s}^{-1}$). **E.** Profil individuel A-S in-situ basé sur quatre séances d'entraînement de football aléatoire sans exercice de sprint spécifiques ($A_0 = 7,3 \text{ m.s}^{-2}$ et $S_0 = 7,0 \text{ m.s}^{-1}$). **F.** Profil individuel A-S in-situ basé sur cinq séances d'entraînement de football aléatoire comprenant une séance de sprint spécifique avec deux sprints de 30 m ($A_0 = 6,2 \text{ m.s}^{-2}$ et $S_0 = 9,3 \text{ m.s}^{-1}$).

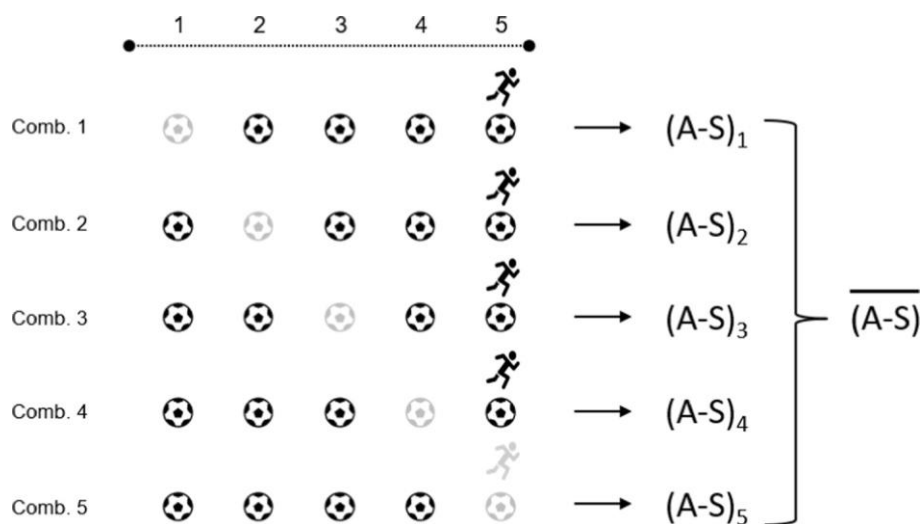


Figure 15 : Exemple pour 4 séances sur une semaine de 5 séances : $\binom{5}{4} = 5$ combinaisons. La première combinaison (Comb. 1) est utilisée pour construire le profil $(A-S)_1$ avec les séances 2, 3, 4 et 5. (Comb. 2) est utilisée pour construire le profil $(A-S)_2$ avec les séances 1, 3, 4 et 5. (Comb. 3) est utilisée pour construire le profil $(A-S)_3$ avec les séances 1, 2, 4 et 5. (Comb. 4) est utilisée pour construire le profil $(A-S)_4$ avec les sessions 1, 2, 3 et 5. (Comb. 5) est utilisée pour construire le profil $(A-S)_5$ avec les sessions 1, 2, 3 et 4. $\overline{(A-S)}$ est la moyenne de ces 5 combinaisons.

Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel statistique R (R v4.0.2. R Foundation for Statistical Computing). Les données sont présentées sous forme de moyenne $\pm$ SD (écart-type) et les données entre parenthèses indiquent les plages de valeurs observées dans cette étude (minimal - maximal). La reproductibilité d'une semaine à l'autre pour chaque variable (A_0 , S_0 , AS_{pente}) a été calculée par le biais du changement de la moyenne et de l'erreur standard de mesure (SEM), tous deux exprimés en unités brutes et en pourcentage des valeurs moyennes. En outre, le SWC ("Smallest Worthwhile Change"), le plus petit changement significatif, a été calculé ($0,2 \times \text{SD}$ entre athlètes). La sensibilité (i.e., la capacité d'un test à illustrer des changements significatifs) a été classée comme suit : bonne ($CV < \text{SWC}$), acceptable ($CV = \text{SWC}$) ou faible ($CV > \text{SWC}$) (Hopkins, 2004). Le coefficient de détermination linéaire (R^2) a été estimée pour prédire la qualité de la régression linéaire.

3. Résultats

Les valeurs descriptives sont présentées dans le **Tableau 14**. A_0 a varié de 5,14 à 8,62 m.s^{-2} en incluant une séance de sprint spécifique et de 5,24 à 9,22 m.s^{-2} dans les combinaisons sans séance de sprint spécifique. S_0 a varié de 7,38 à 12,09 m.s^{-1} lors de l'inclusion d'une séance de sprint spécifique et de 6,23 à 9,55 m.s^{-1} dans les combinaisons sans séance de sprint spécifique.

Les données relatives à la reproductibilité du profil A-S sont présentées dans le **Tableau 15** et le **Tableau 16**.

Sans séance de sprint, le biais moyen a varié de - 8,4 % à 20,8 % et de - 9,3 % à 3,4 % pour S_0 et A_0 respectivement, ce qui a conduit à une faible sensibilité. Cependant, en incluant une séance spécifique au sprint, le biais moyen a varié de - 2 % à 1,1 % et de - 8,1 % à 0,2 % pour S_0 et A_0 respectivement.

Tableau 14 : Principales variables caractérisant le profil A-S en fonction des combinaisons de séances.

Variables	Sessions	Week1	Week2	Week3
S ₀	Sprint	9.87 ± 0.63 (8.91 - 11.07)	9.77 ± 0.56 (8.24 - 10.41)	9.86 ± 0.86 (8.17 - 12.09)
	1	6.69 ± 0.38 (6.23 - 7.52)	8.07 ± 0.28 (7.29 - 8.45)	7.47 ± 0.29 (6.9 - 7.96)
	2	7.19 ± 0.32 (6.64 - 8.09)	8.63 ± 0.28 (7.78 - 9.01)	7.94 ± 0.36 (7.39 - 8.4)
	3	7.35 ± 0.32 (6.79 - 8.09)	8.85 ± 0.34 (7.86 - 9.25)	8.1 ± 0.4 (7.54 - 8.61)
	All ex. sprint	7.45 ± 0.33 (6.96 - 8.07)	9.04 ± 0.4 (7.9 - 9.55)	8.16 ± 0.44 (7.47 - 8.84)
	All	9.53 ± 0.76 (7.38 - 10.76)	9.61 ± 0.36 (9.14 - 10.28)	9.39 ± 0.81 (7.63 - 11.17)
A ₀	Sprint	6.82 ± 0.48 (5.81 - 7.67)	6.56 ± 0.51 (5.44 - 7.72)	6.02 ± 0.59 (5.14 - 7.46)
	1	7.64 ± 0.5 (6.48 - 8.46)	7.07 ± 0.64 (5.24 - 7.99)	7.12 ± 0.43 (6.49 - 8.23)
	2	7.87 ± 0.48 (7.25 - 8.79)	7.13 ± 0.57 (5.49 - 7.88)	7.27 ± 0.36 (6.87 - 8.11)
	3	8.02 ± 0.57 (7.34 - 9.13)	7.27 ± 0.67 (5.36 - 8.28)	7.43 ± 0.41 (6.85 - 8.29)
	All ex. sprint	8.11 ± 0.69 (7.2 - 9.22)	7.39 ± 0.79 (5.36 - 8.89)	7.54 ± 0.46 (6.91 - 8.48)
	All	7.3 ± 0.55 (6.23 - 8.35)	7.3 ± 0.41 (6.7 - 8.28)	6.96 ± 0.54 (6.08 - 8.62)
AS _{pente}	Sprint	-0.7 ± 0.08 (-0.86 - -0.53)	-0.68 ± 0.09 (-0.94 - -0.53)	-0.62 ± 0.11 (-0.91 - -0.44)
	1	-1.17 ± 0.12 (-1.37 - -0.96)	-0.9 ± 0.09 (-1.09 - -0.69)	-0.97 ± 0.08 (-1.13 - -0.82)
	2	-1.11 ± 0.09 (-1.28 - -0.9)	-0.83 ± 0.07 (-1.02 - -0.66)	-0.92 ± 0.07 (-1.1 - -0.83)
	3	-1.1 ± 0.1 (-1.31 - -0.93)	-0.83 ± 0.1 (-1.06 - -0.58)	-0.92 ± 0.08 (-1.1 - -0.8)
	All ex. sprint	-1.09 ± 0.12 (-1.31 - -0.9)	-0.82 ± 0.12 (-1.12 - -0.58)	-0.93 ± 0.09 (-1.11 - -0.79)
	All	-0.78 ± 0.11 (-1.08 - -0.61)	-0.76 ± 0.06 (-0.89 - -0.68)	-0.75 ± 0.12 (-1.06 - -0.56)
R ²	Sprint	0.96 ± 0.03 (0.87 - 0.99)	0.97 ± 0.03 (0.88 - 0.99)	0.95 ± 0.03 (0.89 - 0.98)
	1	0.9 ± 0.03 (0.84 - 0.96)	0.94 ± 0.04 (0.81 - 0.98)	0.92 ± 0.03 (0.85 - 0.97)
	2	0.95 ± 0.02 (0.9 - 0.98)	0.97 ± 0.03 (0.85 - 0.98)	0.96 ± 0.01 (0.94 - 0.99)
	3	0.96 ± 0.02 (0.92 - 0.98)	0.97 ± 0.04 (0.83 - 0.99)	0.97 ± 0.01 (0.96 - 1)
	All ex. sprint	0.96 ± 0.02 (0.92 - 0.98)	0.97 ± 0.04 (0.83 - 0.99)	0.98 ± 0.01 (0.96 - 1)
	All	0.97 ± 0.02 (0.92 - 0.99)	0.99 ± 0.01 (0.97 - 0.99)	0.98 ± 0.01 (0.95 - 0.99)
Nombre de points utilisés dans	Sprint	38.9 ± 2.6 (34 - 44)	40.2 ± 3.7 (33 - 46)	40.6 ± 3.8 (35 - 48)
	1	28.9 ± 5.8 (12 - 39)	34.8 ± 1.6 (32.3 - 38.2)	32.7 ± 4.6 (20 - 43)
	2	32.2 ± 3 (24 - 39)	37.8 ± 1.6 (34.7 - 40.5)	35.6 ± 2.6 (28 - 43)
	3	33.2 ± 2.5 (28 - 39)	39.2 ± 2.1 (35 - 42.4)	36.7 ± 2.5 (32 - 43)

la régression (N)	All ex. sprint	33.6 ± 2.3 (30 - 38)	41.6 ± 4 (35 - 49)	37.1 ± 2.5 (33 - 43)
	All	38.8 ± 3.2 (34 - 44)	41.3 ± 2.9 (37 - 46)	39.1 ± 3.4 (32 - 46)
% V _{max}	Sprint	94.4 ± 2.9 (86.5 - 98.6)	94.9 ± 4.2 (82.4 - 99.4)	93.8 ± 4 (81 - 99.8)
	1	65.1 ± 8.3 (44.5 - 82.6)	79.1 ± 10.1 (51.9 - 98.1)	73.3 ± 9.1 (55.2 - 90.8)
	2	70.1 ± 5.3 (58.3 - 82.6)	85.5 ± 5.8 (72.9 - 98.1)	79.2 ± 6 (60.6 - 90.8)
	3	72.1 ± 4.5 (61.3 - 82.6)	87.7 ± 5.3 (76.1 - 98.1)	81.7 ± 4.8 (70.5 - 90.8)
	All ex. sprint	73.2 ± 4.2 (67.2 - 82.6)	90 ± 4.3 (83.3 - 98.1)	82.5 ± 4.6 (73.7 - 90.8)
	All	94.4 ± 2.9 (86.5 - 98.6)	96.1 ± 2.2 (91.4 - 99.4)	93.9 ± 3.6 (82.9 - 99.8)

Les données sont présentées sous forme de moyenne ± SD (écart-type) et les données entre parenthèses indiquent la plage des valeurs observées (minimale - maximale). Le terme "sprint" désigne la séance de sprint. 1, 2 et 3 représentent respectivement les combinaisons de 1, 2 et 3 séances sans l'inclusion de la séance de sprint. "All ex.sprint" correspond à l'inclusion de toutes les séances de la semaine sans la séance de sprint. "All" signifie l'inclusion de toutes les séances de la semaine. S_0 : vitesse de course théorique maximale ; A_0 : accélération théorique maximale ; AS_{pente} : pente de la relation linéaire accélération-vitesse ; R^2 : coefficient de détermination linéaire; % V_{max} : le pourcentage de la vitesse maximale atteinte.

Tableau 15 : Reproductibilité des principales variables caractérisant le profil A-S en fonction des combinaisons du nombre de séances.

Variables	Sions	Différence brute (W2 – W1)	Différence brute (W3 – W2)	Difference % (W2 from W1)	Difference % (W3 from W2)	TE – W1)	(W2 – W2)	TE (W3 – W2)	TE en CV % (W2 from W1)	TE en CV % (W3 from W2)
S ₀	Sprint	-0.11 ± 0.52	0.09 ± 0.58	-0.93	0.91	0.36		0.41	3.61	4.03
	1	1.37 ± 0.36	-0.59 ± 0.34	20.77	-7.28	0.26		0.24	4.35	2.91
	2	1.44 ± 0.38	-0.69 ± 0.43	20.22	-7.92	0.27		0.3	4.17	3.49
	3	1.49 ± 0.46	-0.75 ± 0.55	20.55	-8.35	0.33		0.39	4.98	4.31
	All ex. sprint	1.59 ± 0.5	-0.88 ± 0.64	21.58	-9.53	0.35		0.46	5.21	4.9
	All	0.06 ± 0.61	-0.19 ± 0.63	1.09	-2.02	0.43		0.44	5.2	4.68
A ₀	Sprint	-0.26 ± 0.59	-0.54 ± 0.37	-3.52	-8.13	0.42		0.26	6.02	3.96
	1	-0.57 ± 0.65	0.05 ± 0.55	-7.26	1.36	0.46		0.39	6.09	6.43
	2	-0.76 ± 0.49	0.15 ± 0.57	-9.58	2.7	0.35		0.4	4.38	6.54
	3	-0.77 ± 0.55	0.18 ± 0.72	-9.48	3.29	0.39		0.51	4.86	8.35
	All ex. sprint	-0.74 ± 0.64	0.17 ± 0.86	-9.03	3.52	0.45		0.61	5.49	9.95
	All	-0.01 ± 0.55	-0.33 ± 0.45	0.21	-4.45	0.39		0.32	5.26	4.36
AS _{pente}	Sprint	0.02 ± 0.09	0.06 ± 0.06	-2.25	-8.61	0.07		0.04	9.3	6.58
	1	0.27 ± 0.14	-0.07 ± 0.1	-22.42	8.42	0.1		0.07	7.31	8.98
	2	0.28 ± 0.1	-0.09 ± 0.11	-24.5	11.63	0.07		0.07	5.75	9.91
	3	0.27 ± 0.12	-0.1 ± 0.14	-24.44	13.54	0.08		0.1	6.76	14.23
	All ex. sprint	0.27 ± 0.13	-0.11 ± 0.16	-24.68	15.83	0.09		0.11	7.41	16.91
	All	0.01 ± 0.11	0.01 ± 0.1	-0.2	-1.73	0.08		0.07	8.71	8.81

TE : erreur type de mesure exprimée à la fois en unités standardisées et en pourcentage (CV, coefficient de variation)..

Tableau 16 : Analyse de la reproductibilité hebdomadaire des principales variables caractérisant le profil A-S.

Variables	Sessions	TE	SWC	Sensibilité
S ₀	Sprint	0.41	0.16	Faible
	1	0.26	0.05	Faible
	2	0.28	0.04	Faible
	3	0.34	0.04	Faible
	All ex. sprint	0.39	0.04	Faible
	All	0.41	0.11	Faible
A ₀	Sprint	0.36	0.10	Faible
	1	0.39	0.08	Faible
	2	0.38	0.07	Faible
	3	0.45	0.08	Faible
	All ex. sprint	0.54	0.1	Faible
	All	0.36	0.08	Faible
AS _{pente}	Sprint	0.06	0.02	Faible
	1	0.09	0.01	Faible
	2	0.08	0.01	Faible
	3	0.09	0.01	Faible
	All ex. sprint	0.10	0.01	Faible
	All	0.07	0.02	Faible

TE : erreur type de mesure. SWC : le plus petit changement significatif ($0,2 \times SD$ entre les athlètes). La sensibilité a été classée comme suit : bonne ($CV < SWC$), acceptable ($CV = SWC$) ou faible ($CV > SWC$), où CV représente le coefficient de variation.

4. Discussion

Les objectifs de cette étude étaient de décrire les différences dans le profil A-S et d'évaluer sa reproductibilité hebdomadaire au cours d'un cycle d'entraînement donné chez de jeunes joueurs de football élite, en fonction du nombre de séances incluses, et d'analyser l'effet de l'inclusion

d'une séance de sprint spécifique. Les principaux résultats de l'étude ont montré que 1) le nombre de séances affecte principalement S_0 alors que A_0 reste similaire, 2) l'effet d'une séance de sprint spécifique est important pour S_0 et modéré pour A_0 , et 3) alors que le nombre de séances n'affecte pas la reproductibilité du profil A-S, il semble que la reproductibilité soit liée à la présence d'une séance de sprint spécifique (i.e., une plage de points spécifique). Compte tenu du fait que ce concept est très récent, plusieurs considérations méthodologiques ont dû être abordées avant qu'il ne puisse être mis en œuvre. Dans un premier temps, nous avons cherché à comprendre comment le nombre de séances d'entraînement de football pouvait influencer le profil A-S. Il est intéressant de noter que les différents nombres de séances d'entraînement de football ont eu une incidence sur le profil A-S. Il est intéressant de noter que le nombre différent de séances (et dans une moindre mesure leur contenu) a eu un effet important sur S_0 . Lorsque la séance spécifique au sprint était exclue (i.e., 1, 2, 3 ou 4 séances), plus le nombre de séances incluses était important, plus le S_0 observé était élevé (une séance, de 6,23 à 8,45 m.s^{-1} ; deux séances, de 6,64 à 9,01 m.s^{-1} ; trois séances, de 6,79 à 9,25 m.s^{-1} ; toutes les séances : de 6,96 à 9,55 m.s^{-1}). En revanche, avec une seule séance de sprint spécifique, des S_0 similaires ont été observées (de 8,17 à 12,09 m.s^{-1}). Par conséquent, selon le nombre et le contenu des séances, les valeurs obtenues pour S_0 peuvent être sous-estimées (pas d'exposition à la vitesse maximale) ou surestimées (exposition à la vitesse maximale, mais pas assez de points dans le modèle) par rapport à celles présentées dans les études précédentes : $9,34 \pm 0,49 \text{ m.s}^{-1}$ (Morin et coll., 2021), $9,47 \pm 0,52 \text{ m.s}^{-1}$ (Alonso-Callejo et coll., 2022) et $9,18 \pm 0,58 \text{ m.s}^{-1}$ (López-Sagarra et coll., 2022). Cependant, avec une semaine complète de données, comprenant un nombre élevé de points, mais aussi une exposition à des vitesses élevées, les valeurs S_0 (de $9,39 \pm 0,81 \text{ m.s}^{-1}$ à $9,61 \pm 0,36 \text{ m.s}^{-1}$) est en accord avec les études précédentes.

De plus, les valeurs S_0 coïncident avec les valeurs de V_0 obtenues à partir du profil F-v classique chez les joueurs de football : $9,25 \pm 0,61 \text{ m.s}^{-1}$ (Jiménez-Reyes et coll., 2018), de $9,18 \pm 0,37 \text{ m.s}^{-1}$ à $9,31 \pm 0,55 \text{ m.s}^{-1}$ (Jiménez-Reyes et coll., 2022) et $9,30 \pm 0,40 \text{ m.s}^{-1}$ (Haugen et coll., 2020). Par conséquent, il semble que le nombre de sessions en soi n'ait probablement pas le facteur le plus important pour établir des profils robustes/reproductibles. Ainsi la collecte d'un nombre suffisant de points de données brutes pour couvrir tout le spectre de la vitesse, de 0 à v_{max} est nécessaire. Cela suggère que le contenu de la session (en particulier pour le domaine de la course à haute vitesse) importe plus que le nombre de séances lui-même et donc que les points de données brutes utilisés. Toutefois, la plage exacte de points nécessaires reste à déterminer et pourrait être établie dans le cadre de recherches ultérieures par le biais de

simulations numériques. Contrairement au profil F-v, la mise en place d'une procédure standardisée n'est pas nécessaire pour établir un profil A-S. D'un point de vue pratique, l'exposition aux matchs ou à la vitesse maximale pourrait être considérée comme une quantité minimale d'informations nécessaire pour établir un profil A-S in situ reproductible si environ 95 % de la vitesse maximale est atteinte. Le but ultime est d'atteindre des accélérations maximales à différentes vitesses pour construire le profil A-S le plus reproductible et valide. Les praticiens doivent tout de même faire preuve de prudence, car la fréquence de courses su maximale est faible dans le football d'élite et dépend du contexte du match, du profil individuel du joueur et de son poste (Buchheit et coll., 2021). Alonso-Callejo et coll. (2022) et Martín-García et coll. (2018) ont montré des différences significatives entre les postes et les jours de microcycle.

Les principaux points à vérifier et à garantir pour une extrapolation reproductible de S_0 devraient être 1) une bonne densité de points bruts sur l'ensemble du spectre de vitesse et d'accélération, 2) des points d'accélération maximale autour du seuil de 3 m.s^{-1} de vitesse (cela peut varier en fonction de la population de joueurs), et 3) l'inclusion de points de vitesse su maximale dans la régression linéaire (au-dessus de 95 % de la vitesse maximale). De plus, il est fortement recommandé d'observer les nuages de données brutes en plus des principaux résultats lors de l'utilisation du concept de profil A-S, étant donné que la reproductibilité des résultats dépend des caractéristiques susmentionnées du nuage de données brutes.

Contrairement à S_0 , A_0 (qui correspond conceptuellement à l'accélération maximale et donc à la capacité de production de force horizontale au sol des joueurs) est moins sensible au contenu des séances (en particulier au contenu du sprint) ou au nombre de séances. Ceci est probablement dû à la nature chaotique du football, qui présente de nombreux mouvements d'accélérations et décélérations pendant les entraînements. Par conséquent, la valeur d'accélération maximale est probablement atteinte plus souvent et plus régulièrement au cours d'un entraînement plutôt qu'au cours d'une séance de sprint isolée, par rapport à la vitesse maximale. La difficulté d'atteindre la vitesse maximale, surtout pendant les entraînements mais aussi pendant les matchs, est due aux contraintes liées au football, les joueurs ayant rarement l'occasion d'effectuer un sprint maximal de 30 à 40 m (qui nécessite plusieurs secondes de sprint linéaires). Pendant les matchs, la plupart des sprints sont de courte durée ($90 \% < 5 \text{ s}$) et ne sont pas assez longs pour atteindre la vitesse maximale (Di Salvo et coll., 2010 & Andrzejewski et coll., 2013). Les accélérations de faible intensité nécessitent un V_0

significativement plus élevé que les accélérations de forte intensité (Oliva-Lozano et coll., 2020). Ainsi, une accélération de haute intensité pourrait être produite à n'importe quel moment de la séance d'entraînement (faible V_0). De plus, la vitesse maximale augmente avec la taille du terrain (Gaudino et coll., 2014 ; Casamichana & Castellano, 2010) alors que le nombre d'accélérations (et de décélérations) diminue (Hodgson et coll., 2014). Cette raison pourrait expliquer pourquoi nous avons trouvé que l'accélération maximale était moins sensible que la vitesse au contenu de l'entraînement. De plus, la densité plus élevée dans les jeux réduits collectifs pourrait expliquer le nombre plus élevé d'accélérations. En effet, les joueurs réalisent le même nombre d'accélérations dans un jeu à 4 contre 4 que dans un match (Hodgson et coll., 2014 ; Dalen et coll., 2021). Par conséquent, le nombre de séances ou leur contenu ne semble pas être un facteur critique pour évaluer correctement A_0 .

Les principaux résultats concernant la reproductibilité d'une semaine à l'autre du profil A-S relatif à S_0 , A_0 et AS_{pente} ont montré que l'erreur typique (i.e., l'erreur aléatoire) se situait respectivement entre 4,68 et 5,20 %, 4,36 et 5,26 % et 8,71 et 8,81 %. Ces résultats sont similaires à ceux fournis par Morin et ses collègues pour A_0 (5,38 %) et plus proches pour S_0 (3,31 %) et AS_{pente} (7,64 %). La faible variation entre les semaines concernant S_0 et AS_{pente} pourrait être expliquée par la différence d'exposition à la vitesse maximale puisque le contenu de l'entraînement ne peut pas être parfaitement contrôlé dans le football d'élite. Néanmoins, les erreurs typiques doivent être considérées en relation avec le changement d'une variable (signal) et son SWC (Buchheit, 2014). Les variables du profil A-S ont présenté des coefficients de variation supérieurs aux SWC, ce qui suggère que seuls des effets modérés à important peuvent être détectés (Buchheit, 2014). Malgré ce rapport signal/bruit limité, le concept présente un rapport coût/bénéfice prometteur. Un écart plus important du biais moyen concernant S_0 (c-à-d l'erreur systématique) a été observé entre W1 et W2 (c-à-d de - 10 à 22 %) par rapport à W2 et W3 (c'est-à-dire de - 9 à 4 %).

De même, le biais moyen concernant A_0 était plus important entre W1 et W2 (i.e., de - 7 à - 9 %) comparé à W2 à W3 (i.e., de 1 à 3 %) sans session de sprint spécifique. La plus grande variabilité concernant le biais moyen est probablement due à la différence de contenu des séances (instructions tactiques, type d'exercices ou de matchs, contenu athlétique) entre les semaines, qui ne pouvait être parfaitement contrôlée dans ce contexte d'entraînement de haut niveau. En effet, au cours de la semaine 1 de l'étude, seuls le contenu physique, les exercices techniques et les matchs à effectifs réduits ont été inclus, tandis que pendant les semaines 2 et

3 des grands jeux et oppositions ont été inclus. Ainsi, le profil A-S est sensible à la fois aux séances de sprint et aux autres caractéristiques de la séance d'entraînement, en particulier la taille des jeux.

En combinaison avec les résultats susmentionnés où S_0 dépendait d'une plage spécifique de points, il est conseillé de prendre en compte au moins une semaine complète d'entraînement incluant des séances de vitesse ou des matchs sur grand terrain pour obtenir un profil A-S reproductible. Alternativement, les données d'un seul match officiel pourraient être considérées car le contexte de jeu devrait permettre au joueur de couvrir l'ensemble du spectre accélération-vitesse, notamment vers des vitesses de course élevées à maximales (données officielles des matchs professionnels n'ont pas été publiées²). En raison de la complexité de l'organisation de tests de sprint réguliers dans un environnement de sport d'élite (logistique, nécessité d'obtenir l'accord du personnel techniques, temps nécessaire, etc.), le profil A-S peut être utilisé comme une méthode alternative pour surveiller les changements entre les semaines et pourrait être utilisé par les praticiens pour surveiller l'état physique des joueurs. Il est important de souligner que le profil A-S est un nouveau concept et que seules des études et des applications supplémentaires permettront de déterminer pleinement son utilité et sa valeur ajoutée. En effet, une équipe qui teste régulièrement les capacités de vitesse maximale et d'accélération des joueurs d'une semaine à l'autre bénéficiera moins de l'utilisation du profil A-S, même s'il lui permet d'avoir une évaluation continue et spécifique au football sans test. Cela dit, à notre connaissance, seulement un nombre très limité d'équipes professionnelles le font de manière cohérente. Cependant, le profil *in situ* pourrait être avantageux à long terme car il permet de surveiller les capacités de sprint individuels des joueurs pendant les activités spécifiques et en particulier pendant les matchs. L'évaluation et le suivi du profil A-S de sprint individuel des joueurs de sports d'équipe (en tant que force-vitesse) pourraient être un outil intéressant à utiliser rétrospectivement dans le contexte du retour au sport et de la gestion des blessures (Mendiguchia et coll., 2014). Des études supplémentaires sont nécessaires pour comprendre comment ces mesures du profil A-S sont liées à d'autres constructions physiques valides telles que le profil F-V ou les marqueurs de la fatigue neuromusculaire (par exemple CMJ, course de box à box) afin d'être pleinement utilisées dans la pratique.

² <https://jbmorin.net/2021/07/29/the-in-situ-sprint-profile-for-team-sports-testing-players-without-testing-them/>.

Limites

Bien que cette étude pilote ait mis en évidence certaines exigences méthodologiques clés concernant le profil A-S, plusieurs limites doivent être discutées. Tout d'abord, la comparaison avec une mesure de référence tel que le profil force-vitesse du sprint linéaire fait défaut. En effet, malgré l'inclusion d'une séance de sprint chaque semaine, le manque de contrôle pendant lors de son exécution a limité l'extrapolation des variables liées au profil F-v (ce qui était initialement recherché). Des études sont en cours pour comparer les variables actuelles liées aux profils A-S et F-v (e.g., S_0 vs. V_0 et A_0 vs. F_0) afin de comprendre quelles sont les qualités physiques associées au profil A-S. Deuxièmement, les résultats de la présente étude ont mis en évidence que S_0 (et donc le profil A-S) dépendait d'une plage spécifique de points (dans le domaine de très haute vitesse).

Cependant, aucune donnée de match officiel n'a été incluse car l'étude a été menée pendant la pandémie de COVID-19 (bien qu'un match amical ait été utilisé), ce qui est probablement un facteur limitant de la présente étude. Malgré l'inclusion d'un match, nos résultats suggèrent que le fait d'inclure ou non un match n'a pas d'importance. Cependant, nous reconnaissons que les études futures devraient inclure des données officielles pour confirmer davantage les résultats de notre étude. Enfin, l'absence de contrôle sur l'état des joueurs (par exemple, la fatigue, la condition physique) pourrait avoir affecté la variabilité observée d'une semaine à l'autre. Par conséquent, le contrôle de ces covariables potentielles aiderait à mieux comprendre comment le profil A-S lui-même pourrait fluctuer dans le temps. Ede plus, étant donné que le système GPS utilisé dans la présente étude et la fréquence d'échantillonnage diffèrent de l'étude conceptuelle de Morin et coll. (2021), des recherches supplémentaires sont nécessaires pour quantifier les différences dans les profils A-S induites par différents systèmes de mesure de la position et vitesse tels que le GPS ou les systèmes de positionnement locaux. Par ailleurs, sur le plan méthodologique, comme l'a souligné Morin et coll. (2021), un seuil de vitesse de 3 m.s^{-1} a été utilisé. De rares valeurs d'accélération maximale ont été observées en dessous de ce seuil pour les footballeurs professionnels masculins, mais il serait intéressant de mesurer un seuil de vitesse en fonction des capacités de sprint (en considérant le niveau, le sexe, la catégorie, etc.) pour les sujets plus jeunes en académie.

5. Applications pratiques

- S_0 dépend du contenu de la session. Les praticiens doivent s'assurer qu'une gamme suffisante de points bruts est incluse pour obtenir des informations significatives concernant S_0 . En particulier, les points de vitesse maximale qui sont proches de la vitesse maximale doivent être présents pour garantir une meilleure reproductibilité. Idéalement, il est recommandé d'utiliser une vitesse maximale supérieure à 95 % de la vitesse maximale individuelle.
- A_0 ne dépend pas du contenu de la séance. Les praticiens n'ont pas besoin d'en tenir compte de manière spécifique, bien qu'une inspection visuelle du "nuage" de données soit recommandée (vérifiez si l'ensemble du spectre est couvert, en particulier les points d'accélération maximale autour du seuil).
- La reproductibilité du profil A-S d'une semaine à l'autre ne dépend pas d'un nombre spécifique de séance et le profil A-S est reproductible. Les praticiens peuvent utiliser ce nouvel outil de suivi pour évaluer l'état physique des joueurs.

6. Conclusion

Cette étude visait à fournir des considérations méthodologiques clés pour les praticiens concernant l'intégration du profil A-S dans l'activité football. La présente étude a montré une faible variabilité d'une semaine à l'autre pour A_0 , S_0 et AS_{pente} . Toutefois, les praticiens doivent envisager d'inclure un nombre et un éventail suffisants de points de données brutes et en particulier un pourcentage élevé de la vitesse maximale (i.e., > 95 %) pour construire une régression linéaire claire et cohérente et extrapoler à son tour des valeurs significatives de S_0 . Des études ultérieures devraient envisager d'inclure un match et de comparer les résultats avec une mesure de référence (e.g., des mesures de profil force-vitesse lors d'un test de sprint linéaire contrôlé).

III. Etude 3. Besoin de tester ? Comparaison entre le profil force-vitesse en sprint et le profil accélération-vitesse *in-situ* chez les jeunes footballeuses élites

Clavel, P., Leduc, C., Morin, J. B., Buchheit, M., & Lacome, M. (submission). Is it worth testing? A direct comparison between force-velocity profile and acceleration-speed profile *in-situ* in elite youth soccer players. Science & medicine in football.

Résumé

Les objectifs de cette étude étaient (1) d'évaluer la validité concurrente du profil A-S par rapport au profil F-v et (2) de décrire l'effet d'un programme d'entraînement en résistance sur les variables des profils A-S et F-v pour quantifier l'ampleur de l'association entre les deux profils.

Dix-neuf joueuses de football élite (âge: $17,2 \pm 0,9$ ans, taille: $166,0 \pm 5,2$ cm, poids: $58,6 \pm 10,4$ kg) ont participé à l'étude. Les données ont été collectées au quotidien pendant cinq semaines consécutives en phase de compétition, i.e., comprenant des entraînements et des matchs. Un cycle d'entraînement en résistance a complété le plan régulier avec chaque semaine deux séances d'endurance-force en salle et une séance de vitesse sur le terrain incluant deux sprints de 30 mètres. Les profils F-v et A-S ont été déterminés chaque semaine, respectivement à partir des sprints et à partir de l'ensemble des données GPS récoltées pendant la semaine. F_0 , V_0 , FV_{pente} et A_0 , S_0 , AS_{pente} ont été extrapolées chaque semaine pour chaque joueuse.

Une large (F_0 vs A_0 , $r = 0,53$ [$0,36 - 0,67$]) à très large (V_0 vs S_0 , $r = 0,82$ [$0,74 - 0,88$]) corrélation a été observée entre les variables du profil F-v et A-S, avec une erreur typique large entre V_0 et S_0 (0,69) et très large entre F_0 et A_0 (1,58). Une très large corrélation a été trouvée entre les taux de variation de toutes les variables (F_0 vs A_0 , $r = 0,90$; V_0 vs S_0 , $r = 0,93$; FV_{pente} vs AS_{pente} , $r = 0,98$) avant et après les cinq semaines.

Les corrélations significatives entre l'évolution des variables du profil A-S et F-v suggèrent que le profil A-S peut être considéré comme un outil valide de suivi des qualités neuromusculaires. Cependant, les praticiens doivent être prudents et ne pas interchanger les deux profils.

Abstract

The aims of this study were (1) to assess the concurrent validity of acceleration-speed (A-S) profile *in-situ* against force-velocity (F-v) profile variables and (2) describe the effect of resistance training program on A-S and F-v profile variables to quantify the magnitude of the association between A-S and F-v profiles.

Nineteen academy female soccer players (age: 17.2 ± 0.9 years, height: 166.0 ± 5.2 cm, body mass: 58.6 ± 10.4 kg) participated in the study. Data were collected from five consecutive weeks of regular training sessions and games. A resistance training program were included during these five weeks with two endurance-strength gym sessions and one speed field training including two 30-m sprints. Each week F-v profile and A-S profile were determined, respectively from the best of the two 30-m sprints and from all the GPS data collected throughout the week. F_0 , V_0 , FV_{slope} and A_0 , S_0 , AS_{slope} were extrapolated for each player and each week.

Large (F_0 vs A_0 , $r = 0.53$ [$0.36 - 0.67$]) to very large (V_0 vs S_0 , $r = 0.82$ [$0.74 - 0.88$]) correlations were observed between F-v and A-S profile derived variables, with very large (1.58 regarding F_0 vs A_0) to large (0.69, regarding V_0 vs S_0) typical error. Very large relationships were found in pre-post changes between F_0 and A_0 ($r = 0.90$), between V_0 and S_0 ($r = 0.93$) and between FV_{slope} and AS_{slope} ($r = 0.98$).

The significant correlations between the evolution of the F-v and A-S profile variables suggests that the A-S profile could be considered as a valid tool to monitor neuromuscular qualities. However, practitioners should be careful and not interchange both profiles among themselves.

1. Introduction

Les qualités neuromusculaires sont des indicateurs de performance clés dans plusieurs sports collectifs, dont le football (Faude et coll., 2012 ; Haugen et coll., 2014). En raison de l'évolution croissante des exigences physiques et de l'augmentation du nombre de match dans les sports professionnels, l'évaluation et le suivi de l'état neuromusculaire des joueurs sont primordiaux étant donné qu'ils peuvent aider les praticiens à adapter les contenus d'entraînement au niveau individuel et à évaluer l'effet de différents programmes d'entraînement de manière non invasive (Leduc et coll., 2019).

Le profil force-vitesse horizontal (F-v) (Morin & Samozino, 2016) a été utilisé à la fois dans la pratique et dans la recherche (Mendiguchia et coll., 2014) pour évaluer les qualités individuelles en sprint. Ce concept permet de déterminer les capacités maximales des joueurs à produire de la force (F_0), de la vitesse (V_0) et de la puissance ($P_{\max}$) lors d'une accélération. Des études récentes ont montré que la technologie GPS représente une alternative valable et reproductible au radar pour calculer le profil F-v (Lacome et coll., 2020 ; Clavel et coll., 2022). Bien que les appareils GPS résolvent plusieurs problématiques pratiques (pas de matériel supplémentaire, pas d'installation et analyses automatiques), plusieurs difficultés subsistent lorsqu'il s'agit d'évaluer le profil F-v dans un environnement de football d'élite. En effet, il peut être difficile pour les praticiens de standardiser un protocole d'évaluation (échauffement, départ arrêté, récupération, etc.) dans une séance d'entraînement. De plus, les entraîneurs et les joueurs eux-mêmes peuvent être réticents à effectuer des efforts maximaux (Leduc et coll., 2019).

Compte tenu de ces limites et de l'augmentation de la précision de la technologie GPS et de sa popularité dans le sport, Morin et coll. (2021) ont mis au point une nouvelle méthode appelée profil accélération-vitesse (A-S) in situ (i.e., au cours d'une activité sportive spécifique). L'idée est d'obtenir un profil mécanique individuel théoriquement équivalent au profil F-v à partir des données collectées "passivement" quotidiennement (i.e., sans équipement supplémentaire autre que le GPS, ni de sprint linéaire maximal). Les données sont utilisées pour construire une relation linéaire entre la vitesse (axe X) et l'accélération (axe Y) dans un contexte écologique (e.g., entraînement, match) permettant d'extrapoler les capacités maximales théoriques des joueurs à produire une accélération (A_0) et une vitesse (S_0). Les profils A-S et F-v diffèrent dans la mesure où l'un est dérivé de situations de football et l'autre d'une tâche de sprint linéaire maximal, mais ils sont conceptuellement très proches. En effet, S_0 et V_0 décrivent tous deux la

vitesse de course maximale théorique et, selon les lois newtoniennes du mouvement (Force = masse * accélération), A_0 et F_0 partagent la même qualité (capacité maximale de mouvement vers l'avant ou force de réaction au sol antéro-postérieure) lorsqu'elles sont exprimées par rapport à la masse corporelle (i.e., m.s^{-2} contre N.kg^{-1} et $\text{N} = \text{kg}^{-1}.\text{m.s}^{-2}$). Ils ne diffèrent que par la friction de l'air mais celle-ci est nulle au début du sprint, i.e., à l'interception de l'axe Y (Smith & Johnson, 2018). Morin et coll. (2021) ont trouvé des valeurs typiques proches de celles rapportées chez les footballeurs professionnels masculins (Jiménez-Reyes et coll., 2018, 2020 ; Haugen et coll., 2019, 2020) concernant S_0 vs V_0 ($9,0$ à $10,0 \text{ m.s}^{-1}$ vs $9,2$ à $9,3 \text{ m.s}^{-1}$) et A_0 vs F_0 ($7,2$ à $7,7 \text{ m.s}^{-2}$ vs $7,1$ à $9,0 \text{ N.kg}^{-1}$). Lopez-Sagarra et coll. (2022) ont obtenu des résultats similaires avec une valeur d'accélération de $6,2 \pm 0,5 \text{ m.s}^{-2}$ et une valeur de vitesse de $9,2 \pm 0,6 \text{ m.s}^{-1}$ en moyenne sur une saison. Clavel et coll. (2023) ont étudié la reproductibilité du profil A-S d'une semaine à l'autre en fonction du nombre de séances et de la présence de sprints. Le profil A-S s'est avéré reproductible lorsque l'ensemble du spectre des points de données brutes est couvert (points d'accélération maximale autour du seuil de 3 m.s^{-1} et vitesse de course maximale proche de la vitesse maximale) alors qu'il s'est avéré peu reproductible lorsqu'il est construit à partir d'un nuage cohérent de points mais de valeurs non maximales d'accélération et de vitesse et qu'il ne décrit alors que l'activité neuromusculaire. Ces résultats sont corroborés par Alonso-Callejo et coll. (2022) qui ont montré que le profil A-S dépendait des jours du microcycle (A_0 varie de $5,7$ à $8,7 \text{ m.s}^{-2}$ et S_0 varie de $5,5$ à $9,5 \text{ m.s}^{-1}$). De plus, Clavel et coll. (2023) ont montré que le profil A-S construit à partir de quelques points avec un nuage de points est incohérent (i.e., $S_0 = 12.09 \text{ m.s}^{-1}$). Bien que ce concept semble prometteur pour évaluer et suivre les capacités neuromusculaires des joueurs de football, d'autant plus qu'il s'est avéré reproductible dans certaines conditions (Morin et coll., 2021 ; Clavel et coll., 2023), la validité de cette approche reste à déterminer.

Par conséquent, les objectifs de cette étude étaient (1) d'évaluer la validité concurrente du profil A-S par rapport au profil F-v et (2) de décrire l'effet d'un programme d'entraînement en résistance sur les variables des profils A-S et F-v pour quantifier l'ampleur de l'association entre les deux profils.

2. Méthode

Sujets

Dix-sept jeunes joueuses de football élite (âge : $17,2 \pm 0,9$ ans ; taille : $166,0 \pm 5,2$ cm ; poids : $58,6 \pm 10,4$ kg) ont été incluses dans le cadre du plan d'entraînement et se sont portées volontaires pour participer à l'étude. Ils ont donné leur consentement écrit pour participer à cette étude, qui a été approuvée par le comité d'éthique local en accord avec la Déclaration d'Helsinki.

Design de l'étude

Les données ont été collectées pendant cinq semaines consécutives auprès de jeunes joueuses de football élite en phase de compétition, i.e., comprenant des entraînements (techniques, physiques et tactiques) et des matchs. Chaque semaine était composée de quatre séances d'entraînement réalisées sur un terrain en synthétique et d'un match. En plus des séances du plan d'entraînement, un cycle d'entraînement en résistance a été inclus dans la procédure (**Figure 16**) pour stimuler les qualités neuromusculaires. Le cycle était composé de deux séances d'endurance-force en salle et d'une séance de vitesse sur le terrain par semaine. Les joueuses avaient une faible expérience sur les séances d'endurance-force et de vitesse. Elles étaient supervisées par le préparateur physique pendant toute la période d'intervention.

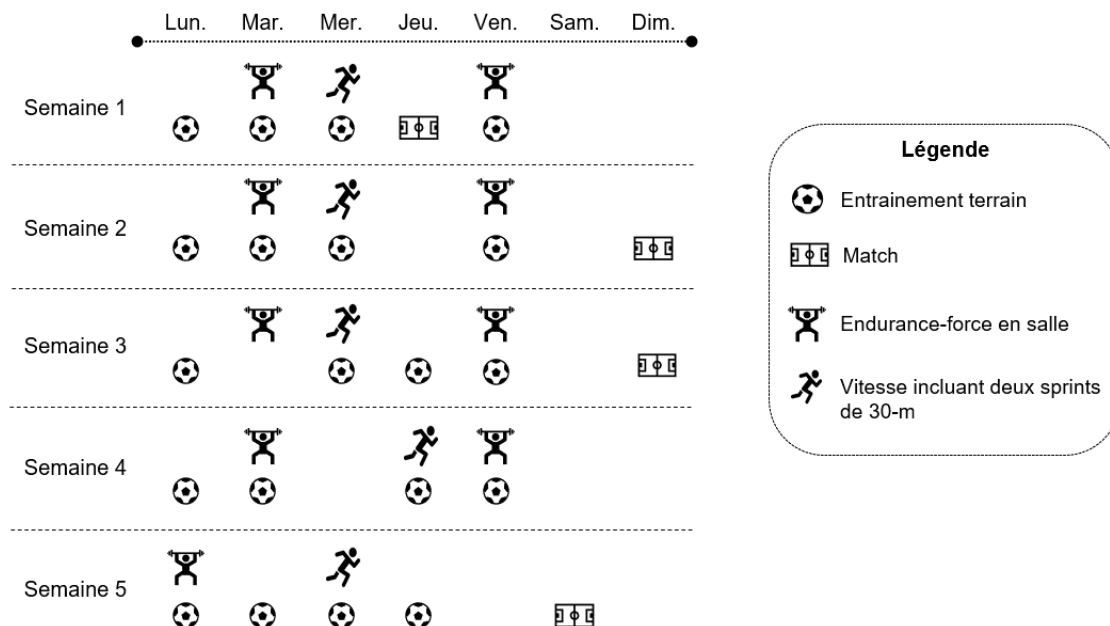


Figure 16 : Représentation schématique des cinq semaines. Chaque semaine était composée de quatre séances d'entraînement terrain, d'un match (sauf la semaine 4), de deux séances endurance-force en salle (sauf la semaine 5) et d'une séance vitesse sur terrain incluant deux sprints de 30 mètres.

Les séances en salle étaient organisées en circuit training avant l'entraînement et duraient 45 minutes. Les joueuses ont effectué quatre tours de circuit chacun composé de six exercices axés sur les membres inférieurs : la planche de Copenhague, le demi-squat, le « hip thrust » (i.e., soulevé de hanche), le « kettlebell swing » (i.e., lancé de kettlebell), le saut vertical sur box et le « Nordic hamstring » (i.e., les ischio-jambiers nordiques). La hauteur de saut et les charges ont été ajustées pour chaque athlète et ont été progressivement augmentées tandis que les répétitions diminuaient au cours des cinq semaines, comme décrit dans le **Tableau 17**.

Tableau 17 : Nombre de répétitions et charges ou hauteur associée du programme d'endurance-force en salle de musculation.

Exercices	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3	Semaine 4	Semaine 5
Demi-squat	15	12	10	8	6
	60% 1RM	65% 1RM	75% 1RM	80% 1RM	85% 1RM
Hip thrust	15	12	10	8	6
	60% 1RM	65% 1RM	75% 1RM	80% 1RM	85% 1RM
Copenhague	40	50	60	30	40
	BW	BW	BW	BW + 10 % BW	BW + 10 % BW
Kettlebell swing	15	12	10	8	6
	4 kg	8 kg	12 kg	16 kg	16 kg + elastic band
Saut vertical	12	10	8	6	4
	60 cm	70 cm	75 cm	80 cm	85 cm
Nordic hamstring	6	8	4	6	8
	BW	BW	BW + 10 % BW	BW + 10 % BW	BW + 10 % BW

Le tableau représente un tour de circuit. Quatre tours sont effectués pendant une séance, avec deux séances par semaine. BW = poids de corps; RM = répétition maximale

Les séances de vitesse se sont déroulées à l'identique au début d'une séance d'entraînement de football et duraient 25 minutes. Une séance comprenait un échauffement (footing léger, exercices de renforcement, exercices de course à pied, étirements dynamiques, exercices de

gainage et d'agilité) suivi d'exercices avec des bandes de résistance et de trois exercices de vitesse suivis d'accélération sur différentes distances (respectivement 10, 15 et 20 m). À la fin, les joueuses effectuaient deux sprints maximaux avec une position de départ debout statique sur une distance de 30 m entrecoupés de 4 minutes de récupération.

Les données ont été collectées avec une unité GPS 10 Hz comprenant un système à double constellation (APEX, STATSports, Irlande du Nord). Les GPS ont été activées 15 minutes avant l'échauffement pour garantir une bonne qualité du signal et éteintes immédiatement après la séance. Chaque unité GPS était placée dans une brassière. La dilution horizontale de précision du signal et le nombre de satellites par session étaient respectivement de $0,46 \pm 23$ et $20,01 \pm 0,89$, ce qui caractérise une bonne qualité de signal (Malone et coll., 2017).

Profil force-vitesse

Le profil F-v a été évalué deux fois par semaine à partir des deux sprints maximaux de 30 m effectués à la fin de l'entraînement de vitesse sur le terrain décrit ci-dessus.

Les variables d'intérêt du profil F-v ont été calculées via un script personnalisé avec le logiciel statistique R (R v4.0.2, R Foundation for Statistical Computing). Il a été précédemment validé et expliqué par Clavel et coll. (2022) et basé sur la méthode de calcul présentée par Samozino et coll. (2016) et Morin et coll. (2019). Le meilleur profil F-v est déterminé comme le profil maximisant la puissance maximale. F_0 , V_0 et FV_{pente} ont été déterminées pour chaque joueuse chaque semaine.

Profil accélération-vitesse in-situ

Pour garantir une construction reproductible du profil (Clavel et coll., 2023), le profil A-S a été évalué chaque semaine à partir des données collectées lors des entraînements (entraînements réguliers et séance de vitesse) et du match. Les variables d'intérêt du profil A-S ont été calculées via un script personnalisé avec le logiciel statistique R (R v4.0.2, R Foundation for Statistical Computing) précédemment détaillé par Clavel et coll. (2023) et basé sur la méthode présentée par Morin et coll. (2021). A_0 , S_0 et AS_{pente} ont été déterminées pour chaque joueuse chaque semaine.

Analyses statistiques

Toutes les données (à l'exception de AS_{pente} et FV_{pente} puisqu'il s'agit de valeurs négatives) ont d'abord été log-transformées pour réduire le biais résultant d'une erreur de non-uniformité (Hopkins et coll., 2009). Cependant, les valeurs présentées dans le texte et les figures sont les données retransformées et sont présentées sous forme de moyenne $\pm$ écart-type. La qualité de l'ajustement linéaire des relations F-v et A-S a été évaluée avec R^2 .

La validité concurrente a été évaluée avec la méthode de Bland-Altman, le biais moyen (CI, 90 %), l'erreur type (TEE, CI à 90 %) en pourcentage et en unités standardisées et les coefficients de corrélation de Pearson (CI à 90 %). La magnitude du biais moyen standardisé, le TEE et les corrélations ont été interprétés comme proposé par Hopkins (2004).

L'évolution des variables avant et après les cinq semaines ont été évalués avec le taux de variation (en pourcentage). Le test t pour échantillons appariés a été utilisé pour analyser le taux de variation. La taille d'effet (ES) a été calculé à l'aide du coefficient de Cohen d. Les valeurs seuils pour évaluer la magnitude des effets standardisés étaient respectivement de 0,20, 0,60, 1,20 et 2,00 pour les effets faibles, modérés, large et très large (Hopkins et coll., 2009). La corrélation et la covariance de Pearson ont été calculées pour établir les relations respectives entre le taux de variation de chaque variable. Les valeurs de p inférieures à 0,05 ont été considérées comme statistiquement significatives. Toutes les analyses statistiques ont été faites à partir de R sur le logiciel RStudio (version 4.0.5).

3. Résultats

Les données liées à l'analyse de validité concurrente sont présentées dans le **Tableau 18**. Les limites d'agréments de l'analyse de Bland-Altman sont présentées dans la **Figure 17**. La corrélation de Pearson a révélé une relation large entre F_0 et A_0 ($r = 0,55$ [0,38 – 0,69]) et une relation très large entre V_0 et S_0 ($r = 0,83$ [0,74 – 0,89]).

Les valeurs moyennes, le taux de variation et la taille d'effet pour toutes les variables analysées sont rapportés dans le **Tableau 19**. Les taux de variation individuels entre les variables de profil F-v et A-S sont rapportés dans la **Figure 18**. Une très large corrélation a été trouvée entre le taux de variation de FV_{pente} et AS_{pente} ($r = 0,98$), F_0 et A_0 ($r = 0,90$) et V_0 et S_0 ($r = 0,93$).

Tableau 18 : Analyse de la validité concurrente des principales variables mécaniques.

Validité	F_0 (N·kg ⁻¹) A_0 (m s ⁻²)	V_0 (m s ⁻¹) S_0 (m s ⁻¹)	FV_{pente} AS_{pente}
F-v	6,18 ± 0,78	8,30 ± 0,57	-0,75 ± 0,11
A-S	7,08 ± 0,62	8,24 ± 0,48	-0,86 ± 0,08
Biais moyen	1,17	-0,10	-1,06
(standardisé)	(0,97 to 1,36)	(-0,23 to 0,02)	(-1,26 to -0,87)
Biais moyen	16,10	-0,68	
(%)	(13,25 to 19,02)	(-1,52 to 0,16)	
TEE	1,58	0,69	1,78
(standardisée)	(1,11 to 2,57)	(0,54 to 0,91)	(1,21 to 3,08)
TEE en tant que CV	11,52	3,98	
(%)	(9,95 to 13,74)	(3,45 to 4,71)	
Pearson	0,53	0,82	0,49
	(0,36 to 0,67)	(0,74 to 0,88)	(0,31 – 0,64)

Les données relatives au profil F-v (F_0 , V_0 et FV_{pente}) et au profil A-S (A_0 , S_0 et AS_{pente}) sont présentées sous forme de moyenne ± écart-type. Les autres statistiques de validité sont présentées avec des intervalles de confiance à 90 %. TEE, erreur typique d'estimation ; CV, coefficient de variation ; F_0 , force maximale théorique ; V_0 , vitesse maximale théorique ; A_0 , accélération maximale théorique ; S_0 , vitesse maximale théorique ; F-v représente le meilleur des deux profils F-v construits respectivement à partir des deux sprints de 30 mètres ; A-S représente le profil A-S in-situ construit à partir de la semaine complète de données d'entraînement et de match ; F-v, force-vitesse ; A-S, accélération-vitesse in-situ.

Tableau 19 : Taux de variation des variables des profils F-v et A-S avant et après les cinq semaines.

		Valeur moyenne avant	Valeur moyenne après	Taux de variation (%) [90% CI]	p valeur	ES [90% CI]
F-v	F ₀ [N·kg ⁻¹]	6,60 ± 0,66	6,39 ± 0,97	-3,34 [-9,55 to 3,14]	0,36	-0,34 [-0,37 to -0,28]
	V ₀ [m·s ⁻¹]	8,39 ± 0,32	8,68 ± 0,52	3,46 [-0,30 to 7,16]	0,13	0,62 [0,54 to 0,64]
	Pente F-V	-0,79 ± 0,07	-0,74 ± 0,11	-5,79	0,23	0,46 [0,40 to 0,49]
A-S	A ₀ [m·s ⁻²]	7,44 ± 0,40	7,27 ± 0,58	-2,20 [-7,39 to 2,69]	0,41	-0,31 [-0,34 to -0,25]
	S ₀ [m·s ⁻¹]	8,24 ± 0,31	8,54 ± 0,44	3,61 [0,24 to 6,80]	0,08	0,73 [0,65 to 0,75]
	Pente (A-S)	-0,90 ± 0,06	-0,85 ± 0,09	-5,10	0,22	0,48 [0,41 to 0,51]

CI, intervalle de confiance ; ES, taille d'effet

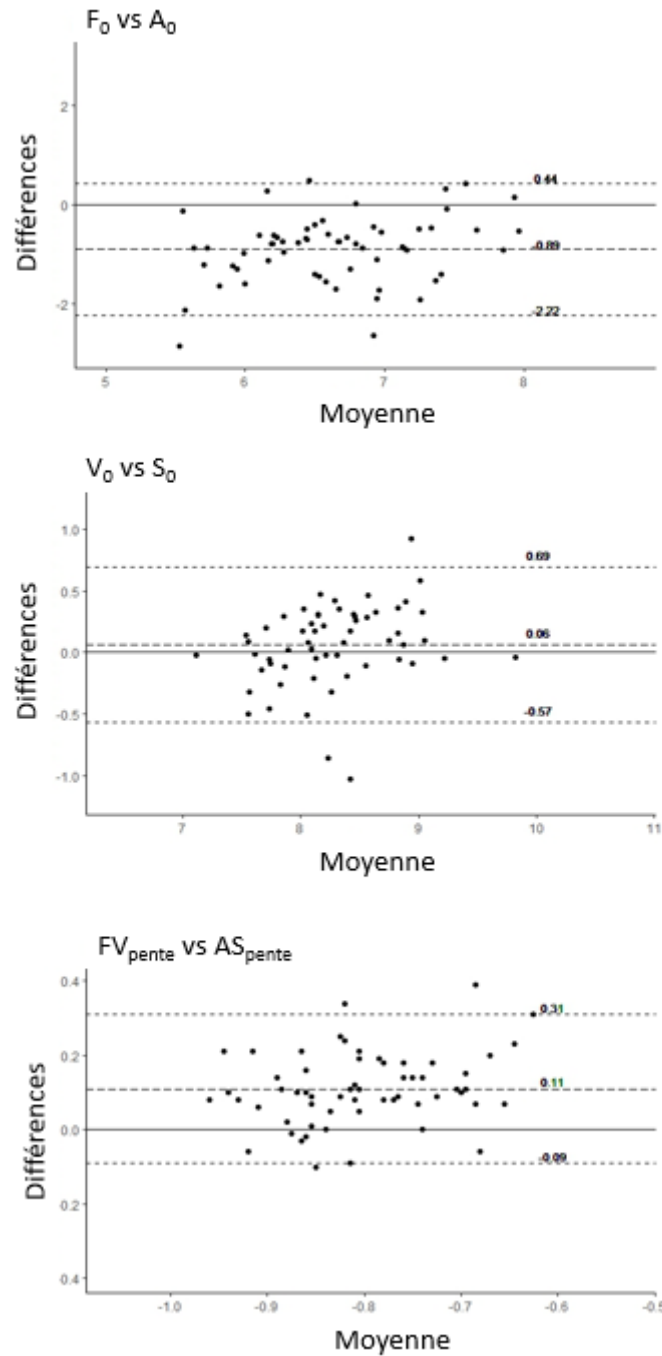


Figure 17 : Graphique de Bland-Altman entre les variables du profil A-S et les variables du profil F-v, respectivement F_0 vs A_0 , V_0 vs S_0 et FV_{pente} vs AS_{pente} . Les lignes en tirets représentent les limites d'agrément.

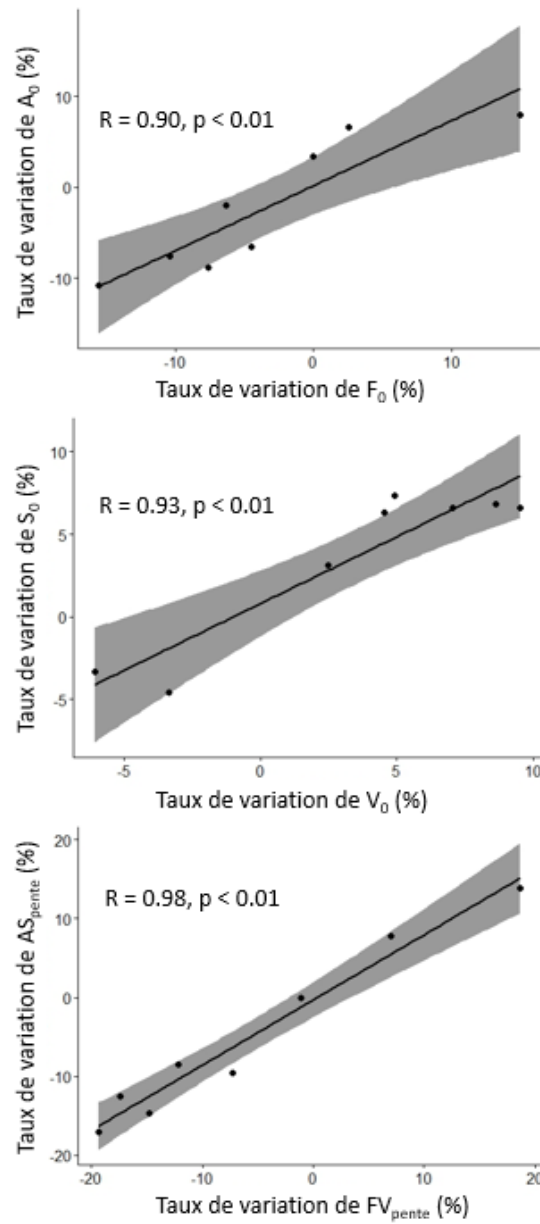


Figure 18 : Corrélacion entre le taux de variation des variables du profil F-v (F_0 , V_0 et FV_{pente}) et les variables du profil A-S (A_0 , S_0 et AS_{pente}) après les cinq semaines. F_0 , force maximale théorique ($N.kg^{-1}$) ; V_0 , vitesse maximale théorique ($m.s^{-1}$) ; A_0 , accélération maximale théorique ($m.s^{-2}$) ; S_0 , vitesse maximale théorique ($m.s^{-1}$)

4. Discussion

Les principaux résultats de cette étude ont montré un biais modéré entre F_0 et A_0 et FV_{pente} et AS_{pente} avec un biais faible entre V_0 et S_0 , mais une très large corrélation entre le taux de variation de toutes les variables entre le profil F-v et A-S. Ces résultats sont prometteurs et pourraient ouvrir de nouvelles possibilités en termes de suivi des qualités neuromusculaires sans tests supplémentaires.

Les résultats ont montré un biais absolu modéré (1,17 [0,97 à 1,36]) entre F_0 et A_0 , ce qui montre une surestimation globale (16,10%) des capacités d'accélération maximales avec l'approche profil A-S. Cette surestimation peut s'expliquer par le fait que les méthodes de calcul sont différentes. Premièrement, le profil F-v est basé sur des prédictions d'un modèle mono-exponentiel tandis que A-S est basé sur des données de vitesse brutes et des régressions linéaires. Ensuite, les variables du profil F-v évaluées à partir des GPS (échantillonnées à 10 Hz et incluant un système à double constellation) ont utilisé un seuil de vitesse de $0,3 \text{ m.s}^{-1}$ (Lacome et coll., 2021 ; Clavel et coll., 2022) pour diminuer le bruit au départ du sprint alors que le profil A-S considère les points à partir d'un seuil de vitesse de 3 m.s^{-1} (Morin et coll., 2021 ; Clavel et coll., 2023). De plus, les profils F-v et A-S diffèrent dans le sens où l'un provient d'un unique sprint maximal linéaire 30 à 40 m tandis que l'autre est dérivé de milliers situations de football. Ces situations incluent des activités à haute intensité telles que des sprints linéaires ou en courbes, de courtes accélérations ou encore des changements de direction (Barnes et coll., 2014). Ces mouvements présentent des exigences mécaniques similaires, impliquant notamment une phase d'accélération importante. Pour cette raison, A_0 pourrait englober différentes qualités physiques telles que la force explosive ou l'agilité. Baena-Raya et coll. (2021) ont étudié l'association entre les variables du profil F-v en sprint et les performances lors des changements de direction (COD) (test 505) chez les footballeurs. Ils ont découvert que P_{max} était l'indicateur le plus corrélé à la performance en COD ($r = -0.79$; $p < 0.001$). Ainsi, l'évaluation du profil A-S in situ ne semble pas évaluer précisément les capacités de force horizontale maximale de l'athlète mais plutôt les capacités d'accélération maximales de l'athlète qui englobe différentes qualités.

Les résultats ont montré un biais trivial entre V_0 et S_0 (biais trivial : $-0,10$ [$-0,23$ à $0,02$]). Ce très faible biais peut s'expliquer par le fait que le profil A-S ne considère que les accélérations positives, ce qui peut conduire à ignorer les points à très grande vitesse lors des phases de vitesse

maximale. L'évaluation du profil A-S in situ apparaît suffisante pour déterminer les capacités de vitesse maximale de l'athlète.

Les résultats ont montré un biais absolu modéré ($-1,06$ [$-1,26$ à $-0,87$]) entre la pente du profil F-v et la pente du profil A-S. Ces résultats peuvent s'expliquer mathématiquement à la fois par la surestimation de A_0 et par la légère sous-estimation de S_0 . En effet, étant donné que $AS_{pente} = -A_0/S_0$ et que $FV_{pente} = -F_0/V_0$, la pente du profil A-S serait plus raide que le profil F-v (visuellement la droite est plus verticale). La pente F-v permet de comparer les forces et faiblesses relatives du profil de chaque joueur avec le reste de l'équipe, puis de programmer le contenu de l'entraînement (Morin & Samozino, 2016). D'un point de vue pratique donc, les praticiens doivent être prudents et éviter la comparaison des pentes entre les deux profils. Plus précisément, le profil F-v et le profil A-S ne sont pas interchangeables.

Après les cinq semaines d'entraînements et le cycle de développement des qualités neuromusculaires, F_0 et A_0 (**Tableau 19**) ont diminué respectivement de manière non significative de 3,34 % et -2,20 % et V_0 et S_0 ont augmenté respectivement de manière non significative de 3,46 % et 3,61 %. De plus FV_{pente} et AS_{pente} ont diminué respectivement de 5,79% et 5,10%. Les taux de variation entre F_0 et A_0 , V_0 et S_0 ainsi que FV_{pente} et AS_{pente} ont montré une très forte corrélation (respectivement $r = 0,90$, $r = 0,93$ et $r = 0,98$). Ces résultats indiquent que peu importe le biais à l'origine, les variables suivent les mêmes évolution dont tout particulièrement les pentes. Par conséquent, ces résultats ont montré que le profil A-S pouvait permettre de surveiller l'évolution des variables mécaniques en sprint sans évaluation.

Limites

Des recherches plus approfondies auprès d'échantillons plus larges ainsi que de populations différentes (masculin, professionnel ou encore sur une autre discipline) sont nécessaires pour confirmer ces résultats. Par ailleurs, les GPS utilisés dans la présente étude sont différents de ceux dans la preuve de concept de Morin et coll. (2021), tout comme la procédure de filtrage qui conduit à une accélération maximale à une vitesse inférieure à 3 m.s^{-1} . Compte tenu à la fois de cette observation et des jeunes sujets féminins, il serait intéressant d'évaluer un seuil de vitesse en fonction des capacités de sprint ou du couple système GPS/procédure de filtrage. Le

profil A-S étant une approche relativement jeune, des études ultérieures devraient prendre en compte des considérations méthodologiques (seuil de vitesse, spectre de points, etc.).

5. Applications pratiques

- A_0 présentait une erreur modérée et une large corrélation par rapport à F_0 . L'accélération maximale théorique semblerait englober d'autres qualités physiques et les joueurs doivent effectuer un sprint linéaire maximal de 30 m pour extrapoler la force théorique horizontale maximale.
- S_0 présentait une erreur triviale et une très large corrélation par rapport à V_0 . Les praticiens peuvent utiliser le profil A-S pour extrapoler la vitesse théorique maximale.
- AS_{pente} présentait une erreur modérée et une corrélation modérée par rapport à FV_{pente} . Les praticiens doivent construire le profil F-v pour déterminer le type de profil (e.g., orienté force, vitesse, etc.) du joueur.
- Les variables des profils A-S et F-v ont montré une très forte corrélation dans le taux de variation de toutes les variables. Les praticiens peuvent utiliser le profil A-S pour surveiller l'évolution des qualités neuromusculaires en continu de manière invisible.

6. Conclusion

La présente étude démontre que, même s'ils ont des concepts similaires, les profils A-S et F-v ne peuvent être utilisés de manière interchangeable. Le profil F-v doit être déterminé pour caractériser les limites mécaniques de l'ensemble du système neuromusculaire des membres inférieurs pour produire de la force horizontale, de la vitesse et de la puissance. Cependant, les corrélations significatives entre l'évolution des variables des profils F-v et A-S suggèrent que le profil A-S pourrait être considéré comme un outil valide pour surveiller en continu les qualités neuromusculaires de manière invisible dans le football. Les études futures devraient continuer à s'intéresser aux questions méthodologiques ainsi qu'à envisager l'application possible de cette approche à d'autres sports d'équipe (e.g., le rugby ou le hockey).

Discussion générale

Ce travail de thèse visait à déterminer si la technologie GPS pouvait servir à évaluer les qualités neuromusculaires dans le football professionnel. Pour répondre à cet objectif le travail de thèse s'est articulé autour de trois études.

La première étude a consisté à analyser la validité concurrente et la reproductibilité inter-unité de la technologie GPS pour l'évaluation du profil force-vitesse horizontal (i.e., des variables F_0 , V_0 et $P_{\max}$). Notre étude a montré que les GNSS (i.e., plusieurs constellations) échantillonnant à 10 Hz présentaient une corrélation modérée pour F_0 , très large pour $P_{\max}$ et presque parfaite pour V_0 avec une faible sous-estimation de toutes les variables (respectivement -0.19, -0.56 et -0.27 %) par rapport à l'outil radar. Alors que V_0 présente une erreur type faible, F_0 est marquée par une erreur type modérée. Cette différence peut s'expliquer par le fait que la vitesse augmente rapidement au début de la phase d'accélération par rapport à la fin du sprint où elle stagne jusqu'à une vitesse maximale. De fait, l'erreur se répercute sur $P_{\max}$, étant donné que cette variable est directement liée à la force et la vitesse. Bien que la fréquence d'échantillonnage joue un rôle prépondérant dans la précision des GPS (Beato et coll., 2018a ; Hoppe et coll., 2018 ; Johnston et coll., 2014), d'autres facteurs entrent en jeu comme les méthodes de filtrage (Malone et coll., 2017) ou le seuil de départ (Fornasier-Santos et coll., 2022). En effet, plus la fréquence d'échantillonnage est faible, plus l'influence de ce seuil est élevée et la méthode de filtrage importante (dépendante de la marque et du modèle du GPS).

D'autre part, le radar est utilisé comme outil de référence dans cette étude. Cependant, celui-ci comporte des limites, principalement sur la phase de démarrage du sprint. Lors d'un départ statique debout, le mouvement sur la phase de démarrage (i.e., buste qui se projette en avant) génère un déplacement vertical du CM (le radar est positionné à 1 m du sol) ainsi qu'un très haut niveau de vitesse horizontale de la vitesse du CM (Slawinski et coll., 2017). Ces deux paramètres peuvent créer du bruit sur les signaux du radar. En effet, le fait de ne pas mesurer la vitesse au centre de la masse peut induire une incertitude quant à la vitesse réelle (Fornasier-Santos et coll., 2022). Cette limite met en avant la nécessité de systématiser la position de départ : statique (e.g., quelques secondes) et debout avec les pieds décalés pour les non spécialistes du sprint (i.e., les footballeurs professionnels) afin de limiter les bruits au départ.

Concernant la reproductibilité, de précédents travaux ont montré que les GPS à 10 Hz avec une double constellation étaient fiables pour l'évaluation du profil force-vitesse en sprint (Lacome et coll., 2020), et que celle-ci était augmentée dans des conditions optimales de collectes de données (terrain en plein air comparativement à un stade). En effet le terrain en plein air permet de maximiser le nombre de satellites et minimiser le HDOP (Malone et coll., 2017). Les résultats de notre étude ont mis en évidence des résultats similaires avec un coefficient de variation inférieure à 5 % (respectivement 1.4, 0.6 et 1.8 pour $P_{\max}$, V_0 et F_0). Ainsi les GPS actuels, incluant une fréquence d'échantillonnage à 10 Hz et une double constellation sont des outils valides et reproductibles pour déterminer le profil F-v en sprint.

Les conclusions de cette étude ouvrent le champ à de nouvelles possibilités quant à l'utilisation des GPS. Certes il s'agit communément d'un outil de contrôle de charge d'entraînement (Akenhead et coll., 2016 ; Cummins et coll., 2013), mais aujourd'hui il devient un outil potentiel d'évaluation des qualités neuromusculaires dont les conditions d'évaluations sont très simples (pas de mise en place et pas de matériel supplémentaire) et le traitement peut être automatisé. Pour obtenir tous les bénéfices de l'utilisation de l'outil GPS, maximiser l'automatisation de l'analyse est un prérequis. Ainsi, les structures professionnelles devraient suivre le processus (**Figure 20**) suivant:

- Etapes non automatisées (via le logiciel du constructeur GPS) :
 - (1) Visualisation et découpage macroscopique des sprints.
 - (2) Export des données brutes.
- Etapes automatisées :
 - (3) Vérification de la qualité des données (i.e., HDOP < 1 et nombre de satellites > 15) (Malone et coll., 2016) (pour passer à l'étape suivante).
 - (4) Application de la méthode pour filtrer les données de vitesse et calculer l'accélération.
 - (5) Découpage de la phase d'accélération (i.e., point de départ, point de fin).
 - (6) Méthode d'optimisation.
 - (7) Calcul des variables du profil F-v.

(8) Génération du rapport (**Figure 19**).

(9) Intégration de l'évaluation dans une base de données (date, variables relatives au joueur, variables relatives au profil F-v, etc.).

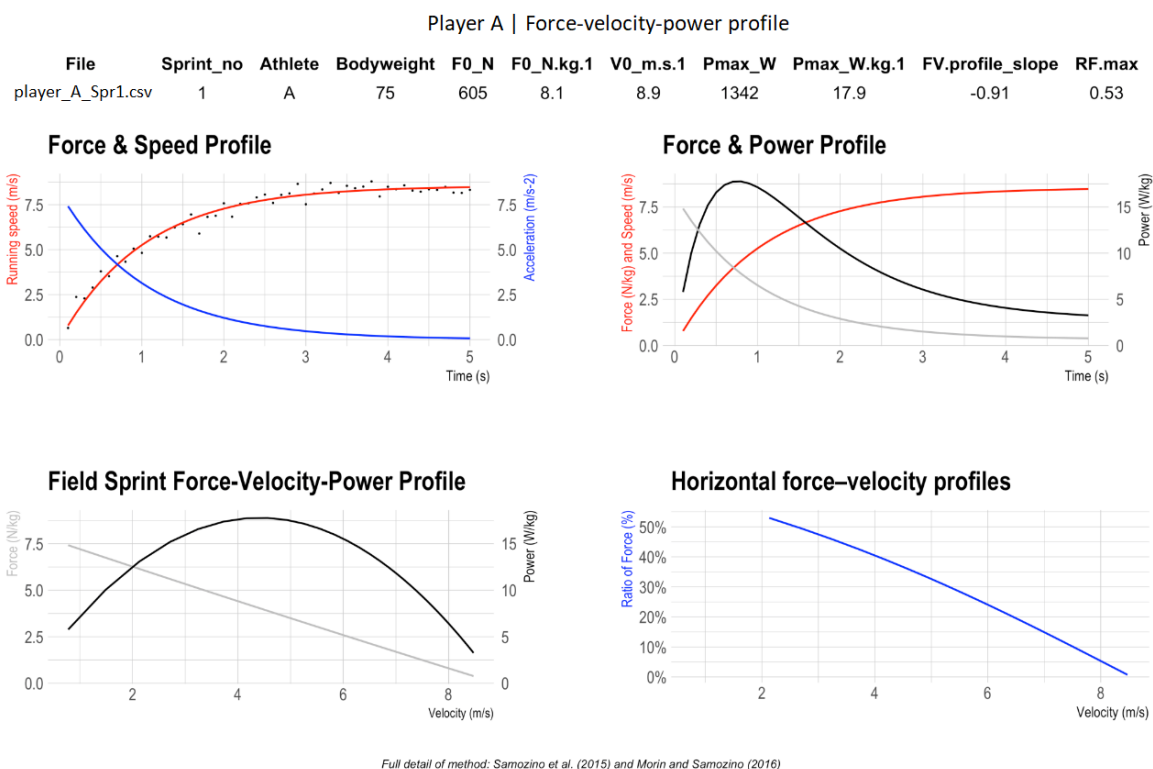


Figure 19 : Exemple d'un rapport généré pour l'évaluation du profil F-v du joueur A.

L'automatisation de l'évaluation offrirait de nombreux avantages. Tout d'abord, elle donnerait la possibilité de déployer une évaluation des qualités neuromusculaires et de l'efficacité de la course en sprint à grande échelle et régulièrement (e.g., début de préparation vs fin de préparation estivale). Ceci présenterait un grand intérêt pour observer les effets de l'entraînement et serait très profitable notamment pour les catégories jeunes (e.g., détection de talents, évolution des qualités, comparaison des profils, repositionnement, etc.). Par ailleurs l'automatisation de l'analyse permettrait de réduire les erreurs humaines. En effet, via la collecte des données avec le GPS, les biais seraient minimisés lors de la collecte (e.g., repères sur l'analyse vidéo) ainsi que lors du traitement des données (e.g., détection du départ du sprint, de la fin de la phase d'accélération, seuil de vitesse, etc.) ce qui augmenterait la qualité de l'analyse étant donné que toutes les étapes sont standardisées.

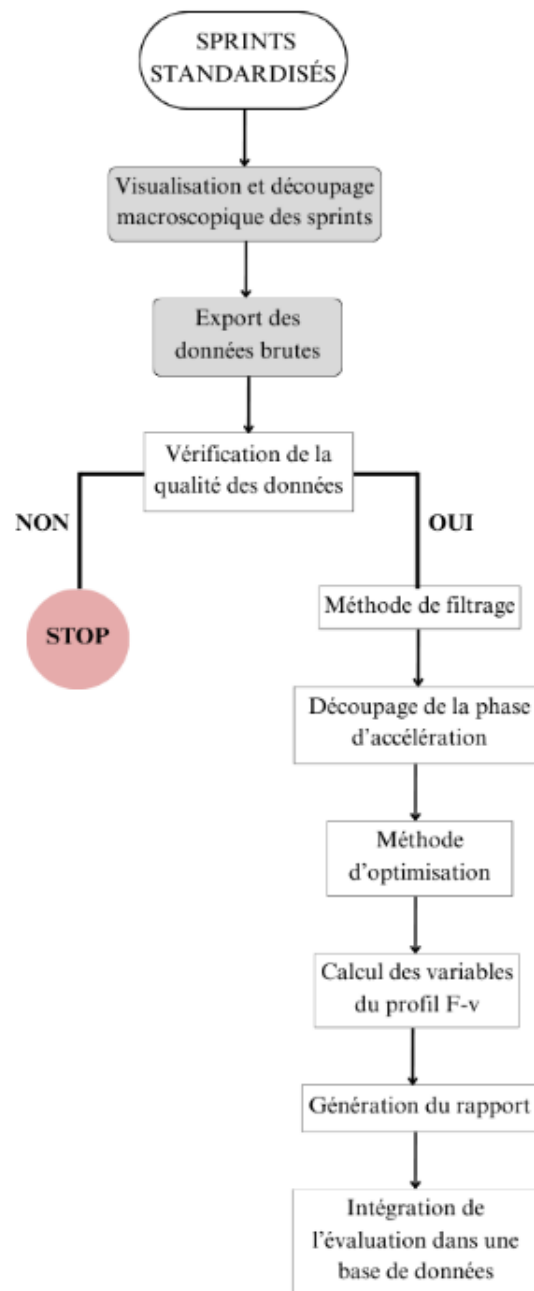


Figure 20 : Processus pour l'évaluation des profil F-v à grande échelle avec les GPS. En blanc les étapes automatisées et en gris celles non automatisées.

Pourtant, bien que les profils F-v présentent de nombreux atouts, les calendriers dans le football professionnel sont de plus en plus chargés (i.e., risque de blessure, fatigue, etc.) (Carling et coll., 2012, 2015 ; Dellal et coll., 2015 ; Julian et coll., 2021). Ainsi, dans cet environnement, planifier des sprints maximaux peut s'avérer difficile. En effet, pour que les valeurs soient

reproductibles, les conditions d'évaluation doivent être identiques (e.g., échauffement standardisé, temps de repos, etc.). Ainsi, comment se passer de la réalisation de sprints maximaux standardisés pour évaluer les qualités neuromusculaires dans l'activité football ?

La deuxième étude de cette thèse a consisté à analyser le nouveau concept développé par Morin et coll. (2021) : le profil accélération-vitesse *in-situ*, et sa reproductibilité dans l'activité football. Dans une *preuve du concept* (Morin et coll., 2021), une méthodologie a été développée (Chapitre 2. II) permettant d'obtenir une relation linéaire entre l'accélération et la vitesse à partir des données GPS récoltées à l'entraînement de manière passive, en contexte écologique, et donc sans évaluation. Notre étude s'est intéressée à la reproductibilité du profil A-S sur trois périodes d'une semaine en fonction du nombre et du contenu de séance inclus (e.g., sprints). De fait, plusieurs questions se posent sur les facteurs pouvant affecter la reproductibilité du nouveau concept (e.g., nombre de séances, nombre de points, spectre de points, etc.). Les résultats montrent que S_0 (i.e., la vitesse maximale théorique) est influencée par le nombre de séances incluses dans l'analyse mais aussi par le contenu des séances, et plus spécifiquement la présence de sprints (i.e., l'exposition à des vitesses maximales). Lorsque les séances n'incluent pas de sprints standardisés, S_0 augmente avec le nombre de séances (de 6.23 à 8.45 m.s⁻¹ pour une séance jusqu'à 6.96 à 9.55 m.s⁻¹ pour 4 séances). Des récents résultats comparables ont été mis en avant par Cormier et coll. (Cormier et coll., 2023) avec une augmentation de S_0 avec le nombre de séance ($S_0 < 7.6$ m.s⁻¹ pour une séance et $S_0 > 8.2$ m.s⁻¹ pour 19 séances). D'un autre côté, lorsqu'uniquement la séance de vitesse est incluse, des valeurs très élevées de S_0 sont observées (de 8.28 à 12.09 m.s⁻¹). S_0 peut être sous-estimé quand il y a peu de séances (absence d'exposition à des vitesses maximales, i.e., points à vitesse faible, mais peu de points à vitesse quasi-maximale). Enfin, les valeurs de S_0 (de 9.39 ± 0.81 m.s⁻¹ à 9.61 ± 0.36 m.s⁻¹) sont en adéquation avec les valeurs de V_0 (9.25 ± 0.61 m.s⁻¹ et 9.30 ± 0.40 m.s⁻¹) obtenues par le profil F-v (respectivement Jiménez-Reyes et coll., 2018 ; Haugen et coll., 2020) lorsque l'analyse inclut toutes les séances de la semaine (i.e., 4 séances ainsi que la séance de sprint standardisé). Les résultats montrent que A_0 (i.e., l'accélération maximale théorique) est plus faiblement influencée par le nombre et le contenu de séances. En effet, alors que les vitesses maximales sont atteintes après 30 à 40 mètres de sprints, les accélérations maximales sont atteintes lors des premiers appuis. La nature chaotique du football engendre une plus grande fréquence de fortes accélérations (e.g., jeux réduits), notamment brèves (Di Salvo et col., 2010), ce qui permet d'avoir des valeurs de A_0 peu sensibles au contenu. Tout de même, l'augmentation du nombre de séances génère un spectre de données plus dense et plus large, ce qui engendre une légère

hausse de A_0 (de 7.07 à 7.64 m.s^{-2} pour une session, 7.39 à 8.11 m.s^{-2} pour 4 séances). Ainsi, notre étude a confirmé la reproductibilité du profil A-S dans l'activité football en prenant en compte les considérations méthodologiques suivantes afin d'extrapoler des valeurs significatives : inclure une forte densité de points (maximiser R^2 , le coefficient de détermination), assurer une accélération maximale atteinte proche du seuil de vitesse (à 3 m.s^{-1}) et une vitesse maximale atteinte proche de la vitesse maximale (90 à 95% de la V_{max}).

- La construction du profil A-S à partir d'une faible densité de points pourrait conduire à des valeurs de vitesse et d'accélération aberrantes d'un point de vue biomécanique et physiologique (e.g., $S_0 = 12,09 \text{ m.s}^{-1} = 43,52 \text{ km.h}^{-1}$).
- La construction du profil A-S à partir de points non maximaux (accélération et vitesse) n'est pas reproductible et n'explique pas les qualités maximales d'accélération et de vitesse du joueur. Cependant il permettrait de décrire les exigences neuromusculaires (e.g., par poste, par jour du microcycle, etc.) (Alonso-Callejo et coll., 2022).
- La construction du profil A-S à partir d'une forte densité de points et de valeurs quasi maximales (accélération et vitesse) permet d'extrapoler les valeurs maximales théoriques d'accélération et de vitesse en contexte écologique.

L'automatisation des profil A-S (i.e., avec les GPS) permettrait de suivre de manière continu les qualités d'accélération et de vitesse. Cependant, au vu de la quantité de données particulièrement massive, l'automatisation de l'analyse est une étape déterminante dont nous recommandons les étapes suivantes :

- Etape non automatisée
 - (1) Export des données brutes
- Etapes automatisées
 - (2) Vérification de la qualité des données (i.e., HDOP < 1 et nombre de satellites > 15) (Malone et coll., 2016) (pour passer à l'étape suivante)
 - (3) Application de la méthode pour filtrer les données de vitesse et calculer l'accélération
 - (4) Suppression des accélérations négatives

(5) Agrégation des séances sur les deux dernières semaines (i.e., les 8 à 10 dernières séances glissantes) (Cormier et coll., 2023).

(6) Vérification des critères de maximalité des données sur la période choisie (i.e., vitesse atteinte $> 0.90 \% V_{\max}$ et accélération atteinte $> 0.90 \% A_{\max}$) (Jaskolska et coll., 1999). Cette étape peut être facultative, en fonction de l'objectif. En effet pour décrire uniquement la charge neuromusculaires sur une période le critère de maximalité n'est pas nécessaire (Alonso-Callejo et coll., 2022)

(8) Calcul des variables du profil A-S

(9) Génération du rapport (**Figure 21**)

(10) Intégration des résultats dans une base de données (période sélectionnée, nombre de séances, variables relatives au joueur, variables relatives au profil F-v, etc.)

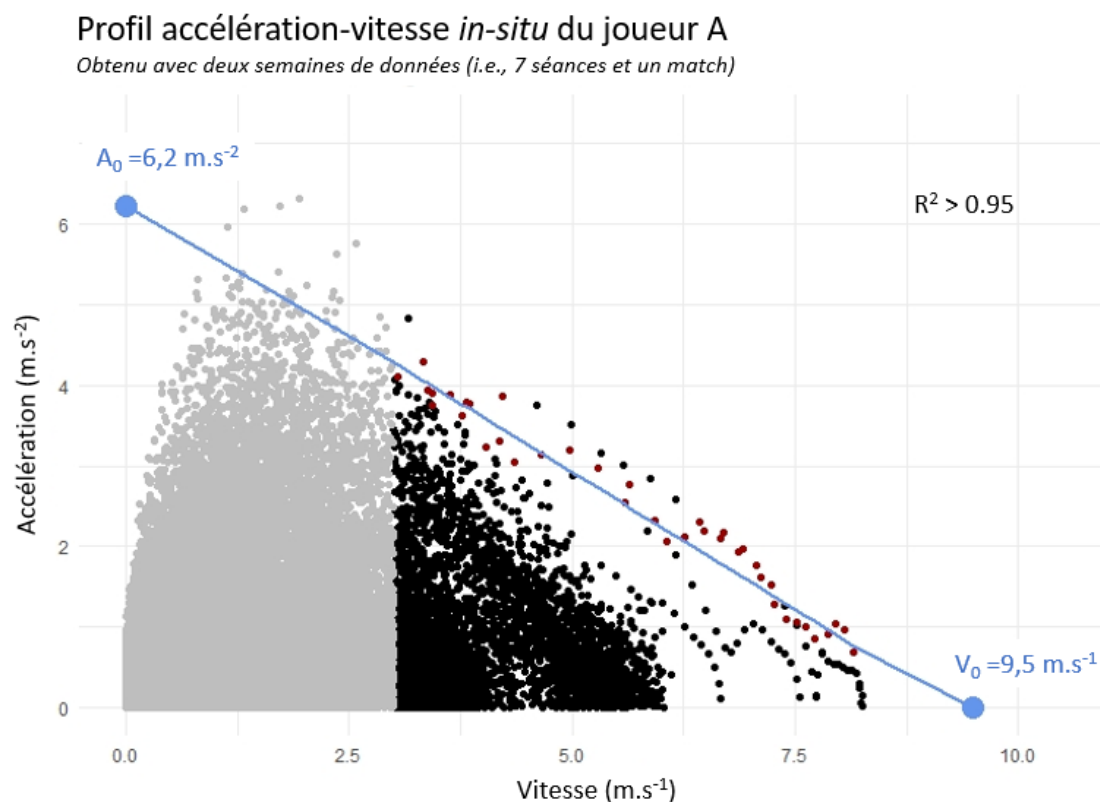


Figure 21 : Profil accélération-vitesse *in-situ* individuel du joueur A obtenu à partir des données GPS récoltées lors d'une semaine d'entraînement. A_0 = accélération maximale théorique, V_0 = vitesse maximale théorique, R^2 = coefficient de détermination

Une des interrogations concernant la construction du profil A-S porte sur la définition du seuil à 3 m.s^{-1} . Ce seuil est défini par Morin et coll. (2021), par rapport au fait que le CM augmente très rapidement à 3 m.s^{-1} sur le premier appui de la phase d'accélération d'un sprint en course à pied. Ainsi il s'agit de la vitesse à laquelle l'accélération est théoriquement à son maximum. Cependant ce seuil est défini plutôt arbitrairement étant donné qu'il ne prend pas en compte les qualités neuromusculaires de la population étudiée ou la méthode de filtrage du GPS utilisée. C'est pourquoi, il serait judicieux d'étudier la variabilité du profil en fonction d'un seuil de vitesse différent (e.g., 2 m.s^{-1}) ou variable (e.g., défini au point d'accélération maximal). En effet, il a été observé dans nos études que les accélérations maximales, à la différence de l'étude de Morin et coll. (2021), étaient plutôt atteintes autour de 2 m.s^{-1} (**Figure 21**). Cette interrogation ouvre à une nouvelle perspective de recherche.

Enfin nos résultats nécessitent des études complémentaires pour déterminer avec précision le spectre de données nécessaires. De récents travaux (Cormier et coll., 2023) ont évalué à neuf (six pour A_0 et neuf pour S_0), le nombre de séances à inclure pour obtenir des résultats comparables au profil F-v (CI à 95%). Évidemment, ces résultats sont dépendants du contenu des séances, surtout étant donné la nature chaotique de l'activité football et des variations individuelles (e.g., les efforts ne sont pas les mêmes en fonction du poste). Par ailleurs, même lors des matchs, les joueurs de football atteignent rarement plus de 95 % de leur vitesse maximale (e.g., 35 % des attaquants et 65 % des milieu de terrain n'atteignent pas 90 % de la V_{max} en compétition) (Buchheit et coll., 2020). Tout de même, étant donné que la relation entre l'accélération et la vitesse est linéaire, il semblerait que la collecte de données de vitesse et d'accélération su-maximales (85 à 90 %) soit suffisante (Jaskolska et coll., 1999).

Enfin, d'un point de vue opérationnel, l'export des données brutes quotidiennes peut rapidement devenir très long (e.g., 90 minutes de séances à 10 Hz pour plus de 20 joueurs). Le développement d'un système d'export automatique (e.g., architecture de données cloud) pourrait permettre de simplifier et fluidifier les processus.

Bien que les concepts entre le profil F-v et le profil A-S semblent très proches conceptuellement, le lien entre ces deux modèles n'a jamais été étudié. Ainsi, une dernière étude (Chapitre 2. III) visait à étudier la validité du profil A-S par rapport au profil F-v et l'évolution des variables des deux profils pendant un cycle de développement de cinq semaines. Les résultats ont révélé une différence moyenne triviale à modérée (- 0.10, 1.17, et -1.06), une corrélation très large à modérée (0.82, 0.53, 0.49) et une erreur type large à très large (0.69,

1.58, 1.78) pour V_0 vs S_0 , F_0 vs A_0 , et FV_{pente} vs AS_{pente} . Par ailleurs, les variables des deux profils ont évolués dans le même sens après les cinq semaines de protocole avec une différence moyenne de -3.34 vs -2.20 % (F_0 vs A_0), 3.46 vs 3.61 (V_0 vs S_0) et -5.79 vs -5.10 (FV_{pente} et AS_{pente}) et une corrélation presque parfaite pour toutes les variables ($r = 0.90$ à 0.98). Il semble donc prudent d'affirmer que les deux modèles reflètent mécaniquement le même concept et qu'ils peuvent être utilisés pour décrire les mêmes qualités. Cependant, les différences observées rappellent que les méthodologies utilisées sont différentes et que les profils ne peuvent pas être utilisés de manière interchangeable. Toutefois, la corrélation presque parfaite des évolutions des variables suggère que le profil A-S permet de suivre les qualités neuromusculaires. Ainsi une utilisation complémentaire des deux modèles semble judicieux dans l'univers du football professionnel où les évaluations maximales sont difficiles à intégrer quotidiennement.

Le biais observé, notamment entre A_0 et F_0 , pourrait s'expliquer par le fait que A_0 n'exprime pas uniquement la capacité de force maximale horizontale théorique mais aussi d'autres qualités (e.g., l'agilité, efficacité de l'application de la force, etc.) dans un contexte écologique. De nouvelles investigations seraient nécessaires pour comprendre précisément ce biais et les qualités pouvant rentrer en jeu. En effet, à la différence du profil F-v, le profil A-S ne permet pas d'étudier l'efficacité mécanique de l'application de la force horizontale au sol. En plus d'évaluer les qualités neuromusculaires, le profil F-v permet via le DR_F and le RF_{max} d'étudier l'efficacité de l'application de la force horizontale au sol (e.g., se rapprocher de RF_{max} à 50%) (Hicks et coll., 2023) et donc d'éventuellement orienter l'entraînement sur de la technique de course.

Par ailleurs, il est primordial de s'intéresser à la précision des données utilisées pour minimiser les risques d'erreur, que ce soit concernant le profil F-v ou A-S. Trois points majeurs à prendre en considération pour la construction sont déterminants pour vérifier la qualité des données et des variables utilisées:

- Vérifier la validité et la reproductibilité du GPS utilisé (e.g., STATSport Apex 10 Hz, Catapult Vector S7, etc.)
- Collecter les données dans un environnement dégagé et mettre en place une routine pour vérifier la qualité des données, surtout lorsque qu'elles sont récoltées dans des conditions inhabituelles (surveiller le nombre de satellites et le HDOP)

- S'informer sur les données utilisées (données brutes vs métriques utilisés par des constructeurs). En effet, les profils varient fortement en fonction des données en entrées et de la méthode de filtrage utilisée. Bien qu'ayant des données brutes quasi-similaires, mais pas toujours accessibles, les différents fournisseurs de GPS utilisent des méthodes de filtrage différentes. Ainsi, une méthode qui filtre « trop » peut surestimer des qualités physiques, alors qu'à l'inverse une méthode qui ne filtre pas assez les bruits extrapolera des données qui sont impossibles d'un point vue biomécanique ou physiologique.

Applications pratiques

- La **Figure 22** présente une illustration schématique (valeurs simulées) d'une double application potentielle. D'un côté, la possible prévention de blessure via l'observation (croix) de l'altération (baisse significative) de A_0 (Mendiguchia et coll., 2016). D'un autre côté le retour au terrain lorsque les valeurs de A_0 et S_0 sont revenus dans les normes, et dans l'objectif de retrouver des valeurs maximales. Dans cet exemple, le profil A-S permet, par rapport au F-v, d'avoir des valeurs maximales théoriques d'accélération et de vitesse en continues (avant la blessure, pendant et après la réathlétisation sans évaluation maximale), sans intervention, propre à l'activité.
- Le suivi en continu du profil A-S pourrait être utilisé pour suivre l'évolution des qualités neuromusculaires lors des différentes phases du cycle menstruel chez la footballeuse. En effet, le cycle menstruel comprend quatre phases bien distinctes : menstruelle, folliculaire, ovulatoire et lutéale. Chacune de ces phases est caractérisée par une forte fluctuation hormonale ce qui engendre variation des qualités neuromusculaires. En fonction des observations, des planifications relatives aux phases du cycle pourrait être mise en place pour optimiser l'entraînement (e.g., travail de puissance pendant la phase d'ovulation dû à une faible fatigue du système nerveux).
- Le profil A-S hebdomadaire (e.g., avec deux semaines de données glissantes) permettrait de suivre l'évolution de A_0 et V_0 afin d'observer les adaptations à l'entraînement. Un système d'alerte pourrait être mis en place pour éventuellement modifier le programme d'entraînement au niveau individuel ou collectif en cas de mauvaise adaptation (e.g., par assez ou trop de sollicitations, altération d'une qualité, etc.).

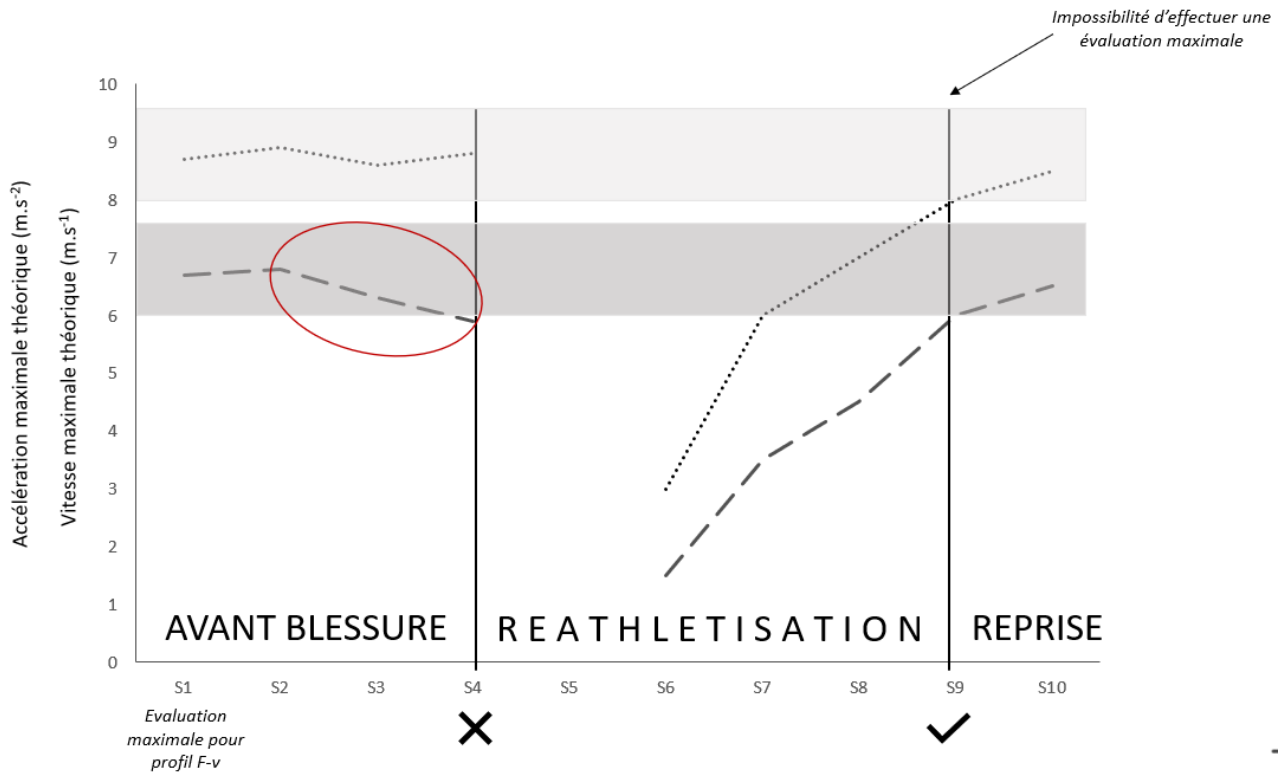


Figure 22 : Illustration schématique de l'utilisation de profil accélération-vitesse in-situ. Représentation de l'évolution de l'accélération maximale théorique (A_0) et de la vitesse maximale théorique (S_0) dérivées du profil A-S en continu sur 10 semaines sans intervention via les données GPS collectées à l'entraînement. La ligne avec les points correspond à S_0 , la ligne avec les tirets représente A_0 . La croix indique le moment de la blessure. La coche indique le moment de la reprise collective.

Bibliographie

- Atkinson, G., & Nevill, A. M. (1998). Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 26(4), 217–238. <https://doi.org/10.2165/00007256-199826040-00002>
- Akenhead, R., Harley, J. A., & Tweddle, S. P. (2016). Examining the External Training Load of an English Premier League Football Team With Special Reference to Acceleration. *Journal of strength and conditioning research*, 30(9), 2424–2432. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001343>
- Akenhead, R., Hayes, P. R., Thompson, K. G., & French, D. (2013). Diminutions of acceleration and deceleration output during professional football match play. *Journal of science and medicine in sport*, 16(6), 556–561. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2012.12.005>
- Akenhead, R., & Nassis, G. P. (2016). Training Load and Player Monitoring in High-Level Football: Current Practice and Perceptions. *International journal of sports physiology and performance*, 11(5), 587–593. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0331>
- Alcazar, J., Csapo, R., Ara, I., & Alegre, L. M. (2019). On the Shape of the Force-Velocity Relationship in Skeletal Muscles: The Linear, the Hyperbolic, and the Double-Hyperbolic. *Frontiers in physiology*, 10, 769. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00769>
- Alonso-Callejo, A., García-Unanue, J., Perez-Guerra, A., Gomez, D., Sánchez-Sánchez, J., Gallardo, L., Oliva-Lozano, J. M., & Felipe, J. L. (2022). Effect of playing position and microcycle days on the acceleration speed profile of elite football players. *Scientific reports*, 12(1), 19266. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23790-w>
- Andersson, H., Ekblom, B., & Krstrup, P. (2008a). Elite football on artificial turf versus natural grass: movement patterns, technical standards, and player impressions. *Journal of sports sciences*, 26(2), 113–122. <https://doi.org/10.1080/02640410701422076>
- Andersson, H. A., Randers, M. B., Heiner-Møller, A., Krstrup, P., & Mohr, M. (2010). Elite female soccer players perform more high-intensity running when playing in international games compared with domestic league games. *Journal of strength and conditioning research*, 24(4), 912–919. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181d09f21>

- Arsac, L. M., Belli, A., & Lacour, J. R. (1996). Muscle function during brief maximal exercise : accurate measurements on a friction-loaded cycle ergometer. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 74(1-2), 100-106. <https://doi.org/10.1007/bf00376501>
- Arsac, L. M., & Locatelli, E. (2002). Modeling the energetics of 100-m running by using speed curves of world champions. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 92(5), 1781–1788. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00754.2001>
- Aughey, R. J. (2011). Applications of GPS Technologies to Field Sports. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6(3), 295-310. <https://doi.org/10.1123/ijsspp.6.3.295>
- Baena-Raya, A., García-Mateo, P., García-Ramos, A., Rodríguez-Pérez, M. A., & Soriano-Maldonado, A. (2021). Delineating the potential of the vertical and horizontal force-velocity profile for optimizing sport performance: A systematic review. *Journal of sports sciences*, 40(3), 331–344. <https://doi.org/10.1080/02640414.2021.1993641>
- Balsalobre-Fernández, C., Glaister, M., & Lockett, R. A. (2015). The validity and reliability of an iPhone app for measuring vertical jump performance. *Journal of sports sciences*, 33(15), 1574–1579. <https://doi.org/10.1080/02640414.2014.996184>
- Bangsbo, J. (2014). Physiological demands of football. *Sports Science Exchange*, 27(125), 1-6.
- Bangsbo, J., & Michalsik, L. (2002). Assessment and Physiological Capacity of Elite Soccer Players. In T. Reilly, & A. Murphy (Eds.), *Science and Football IV*, 53-6).
- Bangsbo, J., Nørregaard, L., & Thorsøe, F. (1991). Activity profile of competition soccer. *Canadian Journal of Sports Science*, 16(2), 110-116.
- Baptista, I., Johansen, D., Figueiredo, P., Rebelo, A., & Pettersen, S. A. (2019). Positional Differences in Peak- and Accumulated- Training Load Relative to Match Load in Elite Football. *Sports (Basel, Switzerland)*, 8(1), 1. <https://doi.org/10.3390/sports8010001>
- Baptista, I., Johansen, D., Seabra, A., & Pettersen, S. A. (2018). Position specific player load during match-play in a professional football club. *PloS one*, 13(5), e0198115. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198115>
- Barnes, C., Archer, D.T., Hogg, B., Bush, M., & Bradley, P. S. (2014). The Evolution of Physical and Technical Performance Parameters in the English Premier League. *International Journal of Sports Medicine*, 35(13), 1095-1100. <https://doi.org/10.1055/s-0034-1375695>
- Barrera-Domínguez, F. J., Almagro, B. J., Sáez de Villarreal, E., & Molina-López, J. (2023). Effect of individualised strength and plyometric training on the physical performance of basketball

players. *European journal of sport science*, 1–10. Advance online publication. <https://doi.org/10.1080/17461391.2023.2238690>

Barros, R. M. L., Misuta, M. S., Menezes, R. P., Figueroa, P. J., Moura, F. A., Cunha, S. A., Anido, R., & Leite, N. J. (2007). Analysis of the distances covered by first division brazilian soccer players obtained with an automatic tracking method. *Journal of sports science & medicine*, 6(2), 233-242.

Baumgart, C., Freiwald, J., & Hoppe, M. W. (2018). Sprint Mechanical Properties of Female and Different Aged Male Top-Level German Soccer Players. *Sports (Basel, Switzerland)*, 6(4), 161. <https://doi.org/10.3390/sports6040161>

Beato, M., Coratella, G., Stiff, A., & Iacono, A. D. (2018). The Validity and Between-Unit Variability of GNSS Units (STATSports Apex 10 and 18 Hz) for Measuring Distance and Peak Speed in Team Sports. *Frontiers in physiology*, 9, 1288. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01288>

Beato, M., Devereux, G., & Stiff, A. (2018). Validity and Reliability of Global Positioning System Units (STATSports Viper) for Measuring Distance and Peak Speed in Sports. *Journal of strength and conditioning research*, 32(10), 2831–2837. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002778>

Beato, M., & de Keijzer, K. L. (2019). The inter-unit and inter-model reliability of GNSS STATSports Apex and Viper units in measuring peak speed over 5, 10, 15, 20 and 30 meters. *Biology of Sport*, 36(4), 317-321. <https://doi.org/10.5114/biolSport.2019.88754>

Best, C.H., & Partridge, R.C. (1928). The equation of motion of a runner, exerting a maximal effort. *Proceedings of The Royal Society B : Biological Sciences*, 103, 218-225.

Bevan, H. R., Cunningham, D. J., Tooley, E. P., Owen, N. J., Cook, C. J., & Kilduff, L. P. (2010). Influence of postactivation potentiation on sprinting performance in professional rugby players. *Journal of strength and conditioning research*, 24(3), 701–705. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181c7b68a>

Bezodis, N. E., Salo, A. I., & Trewartha, G. (2012). Measurement error in estimates of sprint velocity from a laser displacement measurement device. *International journal of sports medicine*, 33(6), 439–444. <https://doi.org/10.1055/s-0031-1301313>

Bloomfield, J., Polman, R., & O'Donoghue, P. (2007). Physical Demands of Different Positions in FA Premier League Soccer. *Journal of sports science & medicine*, 6(1), 63-70. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24149226/>

Bobbert M. F. (2012). Why is the force-velocity relationship in leg press tasks quasi-linear rather than hyperbolic?. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 112(12), 1975–1983. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00787.2011>

Bolger, R., Lyons, M., Harrison, A. J., & Kenny, I. C. (2015). Sprinting performance and resistance-based training interventions: a systematic review. *Journal of strength and conditioning research*, 29(4), 1146–1156. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000720>

Bosco, C., Belli, A., Astrua, M., Tihanyi, J., Pozzo, R., Kellis, S., Tsarpela, O., Foti, C., Manno, R., & Tranquilli, C. (1995). A dynamometer for evaluation of dynamic muscle work. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 70(5), 379–386. <https://doi.org/10.1007/BF00618487>

Bradley, P. S., & Ade, J. D. (2018). Are Current Physical Match Performance Metrics in Elite Soccer Fit for Purpose or Is the Adoption of an Integrated Approach Needed?. *International journal of sports physiology and performance*, 13(5), 656–664. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0433>

Bradley, P. S., Archer, D. T., Hogg, B., Schuth, G., Bush, M., Carling, C., & Barnes, C. (2016). Tier-specific evolution of match performance characteristics in the English Premier League: it's getting tougher at the top. *Journal of sports sciences*, 34(10), 980–987. <https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1082614>

Bradley, P. S., Carling, C., Archer, D., Roberts, J., Dodds, A., Di Mascio, M., Paul, D. J., Diaz, A. G., Peart, D. J., & Krustup, P. (2011). The effect of playing formation on high-intensity running and technical profiles in English FA Premier League soccer matches. *Journal of Sports Sciences*, 29(8), 821-830. <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.561868>

Bradley, P. S., Carling, C., Gomez Diaz, A., Hood, P., Barnes, C., Ade, J., Boddy, M., Krustup, P., & Mohr, M. (2013). Match performance and physical capacity of players in the top three competitive standards of English professional soccer. *Human movement science*, 32(4), 808–821. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2013.06.002>

Bradley, P. S., Di Mascio, M., Peart, D., Olsen, P., & Sheldon, B. (2010). High-Intensity Activity Profiles of Elite Soccer Players at Different Performance Levels. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(9), 2343-2351. <https://doi.org/10.1519/jsc.0b013e3181aeb1b3>

Bradley, P. S., Lago-Peñas, C., Rey, E., & Gomez Diaz, A. (2013). The effect of high and low percentage ball possession on physical and technical profiles in English FA Premier League soccer matches. *Journal of sports sciences*, 31(12), 1261–1270. <https://doi.org/10.1080/02640414.2013.786185>

Bradley, P. S., Mohr, M., Bendiksen, M., Randers, M. B., Flindt, M., Barnes, C., Hood, P., Gomez, A., Andersen, J. L., Di Mascio, M., Bangsbo, J., & Krustup, P. (2011). Sub-maximal and maximal Yo-Yo intermittent endurance test level 2: heart rate response, reproducibility and application to elite soccer. *European journal of applied physiology*, 111(6), 969–978. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1721-2>

- Bradley, P. S., & Noakes, T. D. (2013). Match running performance fluctuations in elite soccer : Indicative of fatigue, pacing or situational influences ? *Journal of Sports Sciences*, 31(15), 1627-1638. <https://doi.org/10.1080/02640414.2013.796062>
- Bradley, P. S., O'Donoghue, P., Wooster, B., & Tordoff, P. (2007). The reliability of ProZone MatchViewer : a video-based technical performance analysis system. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 7(3), 117-129. <https://doi.org/10.1080/24748668.2007.11868415>
- Bradley, P. S., & Scott D (2020). Physical Analysis of the FIFA Women's World Cup France 2019™. Zurich: FIFA
- Bradley, P. S., Sheldon, W., Wooster, B., Olsen, P., Boanas, P., & Krstrup, P. (2009). High-intensity running in English FA Premier League soccer matches. *Journal of Sports Sciences*, 27(2), 159-168. <https://doi.org/10.1080/02640410802512775>
- Bradley, P. S., & Vescovi, J. D. (2015). Velocity thresholds for women's soccer matches: sex specificity dictates high-speed running and sprinting thresholds - Female Athletes in Motion (FAiM). *International journal of sports physiology and performance*, 10(1), 112–116. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2014-0212>
- Buchheit, M., Samozino, P., Glynn, J. A., Michael, B. S., Al Haddad, H., Mendez-Villanueva, A., & Morin, J. B. (2014). Mechanical determinants of acceleration and maximal sprinting speed in highly trained young soccer players. *Journal of Sports Sciences*, 32(20), 1906-1913. <https://doi.org/10.1080/02640414.2014.965191>
- Buchheit, M., Settembre, M., Hader, K., & McHugh, D. (2023). Planning the Microcycle in Elite Football: To Rest or Not to Rest?. *International journal of sports physiology and performance*, 18(3), 293–299. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2022-0146>
- Buchheit, M., & Simpson, B. M. (2017). Player-Tracking Technology : Half-Full or Half-Empty Glass ? *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(s2), S235-S241. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0499>
- Bush, M., Archer, D. T., Barnes, C., Hogg, R., & Bradley, P. S. (2017). Longitudinal match performance characteristics of UK and non-UK players in the English Premier League, *Science and Medicine in Football*, 1:1, 2-9, DOI: 10.1080/02640414.2016.1233347
- Bush, M., Archer, D. T., Hogg, R., & Bradley, P. S. (2015). Factors influencing physical and technical variability in the English Premier League. *International journal of sports physiology and performance*, 10(7), 865–872. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2014-0484>

- Bush, M., Barnes, C., Archer, D. T., Hogg, B., & Bradley, P. S. (2016). Evolution of match performance parameters for various playing positions in the English Premier League. *Human Movement Science*, 39, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2014.10.003>
- Cahill, M. J., Oliver, J. L., Cronin, J. B., Clark, K., Cross, M. R., Lloyd, R. S., & Lee, J. E. (2020). Influence of Resisted Sled-Pull Training on the Sprint Force-Velocity Profile of Male High-School Athletes. *Journal of strength and conditioning research*, 34(10), 2751–2759. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003770>
- Carling, C., Thomas, R., & Williams, A. M. (2009). Performance assessment in field sports. *Journal of Sports Science & Medicine*, 8(1).
- Carling, C., Thomas, R., & Williams, A. M. (2009). Performance assessment in field sports. *Journal of Sports Science & Medicine*, 8(1).
- Carling, C., Espié, V., Le Gall, F., Bloomfield, J., & Jullien, H. (2010). Work-rate of substitutes in elite soccer : A preliminary study. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(2), 253-255. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2009.02.012>
- Carling, C., Le Gall, F., & Dupont, G. (2012). Analysis of repeated high-intensity running performance in professional soccer. *Journal of Sports Sciences*, 30(4), 325-336. <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.652655>
- Carling, C., McCall, A., Le Gall, F., & Dupont, G. (2016). The impact of short periods of match congestion on injury risk and patterns in an elite football club. *British Journal of Sports Medicine*, 50(12), 764-768. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095501>
- Carling, C., Lacome, M., McCall, A., Dupont, G., Le Gall, F., Simpson, B., & Buchheit, M. (2018). Monitoring of Post-match Fatigue in Professional Soccer: Welcome to the Real World. *Sports medicine*, 48(12), 2695–2702. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0935-z>
- Castagna, C., Varley, M., Póvoas, S. C. A., & D'Ottavio, S. (2017). Evaluation of the Match External Load in Soccer: Methods Comparison. *International journal of sports physiology and performance*, 12(4), 490–495. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0160>
- Castellano, J., Casamichana, D., Calleja-González, J., Román, J. S., & Ostojic, S. M. (2011). Reliability and Accuracy of 10 Hz GPS Devices for Short-Distance Exercise. *Journal of sports science & medicine*, 10(1), 233–234.
- Cavagna G. A. (1975). Force platforms as ergometers. *Journal of applied physiology*, 39(1), 174–179. <https://doi.org/10.1152/jappl.1975.39.1.174>

- Cavagna, G. A., Komarek, L., & Mazzoleni, S. (1971). The mechanics of sprint running. *The Journal of physiology*, 217(3), 709–721. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1971.sp009595>
- Chelly, S. M., Fathloun, M., Cherif, N., Ben Amar, M., Tabka, Z., & Van Praagh, E. (2009). Effects of a back squat training program on leg power, jump, and sprint performances in junior soccer players. *Journal of strength and conditioning research*, 23(8), 2241–2249. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181b86c40>
- Chelly, S. M., & Denis, C. (2001). Leg power and hopping stiffness: relationship with sprint running performance. *Medicine and science in sports and exercise*, 33(2), 326–333. <https://doi.org/10.1097/00005768-200102000-00024>
- Clavel, P., Leduc, C., Morin, J. B., Buchheit, M., & Lacome, M. (2023). Reliability of individual acceleration-speed profile in-situ in elite youth soccer players. *Journal of Biomechanics*, 153, 111602. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2023.111602>
- Clavel, P., Leduc, C., Morin, J. B., Owen, C., Samozino, P., Peeters, A., Buchheit, M., & Lacome, M. (2022). Concurrent validity and reliability of sprinting Force–Velocity profile assessed with GPS devices in elite athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 17(10), 1527–1531. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2021-0339>
- Clark, K. P., & Weyand, P. G. (2015). Sprint running research speeds up: A first look at the mechanics of elite acceleration. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 25(5), 581–582. <https://doi.org/10.1111/sms.12520>
- Clemente, F. M., Couceiro, M. S., Martins, F. M., Ivanova, M. O., & Mendes, R. (2013). Activity profiles of soccer players during the 2010 world cup. *Journal of human kinetics*, 38, 201–211. <https://doi.org/10.2478/hukin-2013-0060>
- Cometti, G., Maffiuletti, N., Pousson, M., Chatard, J., & Maffulli, N. (2001). Isokinetic Strength and Anaerobic Power of Elite, Subelite and Amateur French Soccer Players. *International Journal of Sports Medicine*, 22(1), 45–51. <https://doi.org/10.1055/s-2001-11331>
- Comfort, P., Stewart, A., Bloom, L., & Clarkson, B. (2013). Relationships between strength, sprint, and jump performance in well-trained youth soccer players. *Journal of strength and conditioning research*, 28(1), 173–177. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318291b8c7>
- Cormier, P., Tsai, M. C., Meylan, C., Soares, V. H. T., Clarke, D. C., & Klimstra, M. (2023). Minimal Number of Events Required for Acceleration-Speed Profiling in Elite Women's Soccer. *International journal of sports physiology and performance*, 1–4. Advance online publication. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2023-0223>

- Coutts, A. J., & Duffield, R. (2010). Validity and reliability of GPS devices for measuring movement demands of team sports. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(1), 133-135. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2008.09.015>
- Cronin, J., Ogden, T., Lawton, T., & Brughelli, M. (2007). Does increasing maximal strength improve sprint running performance?. *Strength & Conditioning Journal*, 29(3), 86-95.
- Cross, M. R., Brughelli, M., Brown, S. R., Samozino, P., Gill, N. D., Cronin, J. B., & Morin, J. B. (2015). Mechanical Properties of Sprinting in Elite Rugby Union and Rugby League. *International journal of sports physiology and performance*, 10(6), 695–702. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2014-0151>
- Cross, M. R., Lahti, J., Brown, S. R., Chedati, M., Jimenez-Reyes, P., Samozino, P., Eriksrud, O., & Morin, J. B. (2018). Training at maximal power in resisted sprinting: Optimal load determination methodology and pilot results in team sport athletes. *PloS one*, 13(4), e0195477. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195477>
- Cross, M. R., Samozino, P., Brown, S. R., & Morin, J. B. (2018). A comparison between the force-velocity relationships of unloaded and sled-resisted sprinting: single vs. multiple trial methods. *European journal of applied physiology*, 118(3), 563–571. <https://doi.org/10.1007/s00421-017-3796-5>
- Cummins, C., Orr, R., O'Connor, H., & West, C. (2013). Global positioning systems (GPS) and microtechnology sensors in team sports: a systematic review. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 43(10), 1025–1042. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0069-2>
- Dalen, T., Ingebrigtsen, J., Ettema, G., Hjelde, G. H., & Wisløff, U. (2016). Player Load, Acceleration, and Deceleration During Forty-Five Competitive Matches of Elite Soccer. *Journal of strength and conditioning research*, 30(2), 351–359. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001063>
- 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. *Journal of strength and conditioning research*, 31(9), 2379–2387. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001575>
- Davies, C. T., & Young, K. (1984). Effects of external loading on short term power output in children and young male adults. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 52(3), 351-354. <https://doi.org/10.1007/bf01015226>
- De Haan A. (1998). The influence of stimulation frequency on force-velocity characteristics of in situ rat medial gastrocnemius muscle. *Experimental physiology*, 83(1), 77–84. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.1998.sp004093>

- Delaney, J. A., Thornton, H. R., Burgess, D. J., Dascombe, B. J., & Duthie, G. M. (2017). Duration-specific running intensities of Australian Football match-play. *Journal of science and medicine in sport*, 20(7), 689–694. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2016.11.009>
- Dellal, A., Lago-Peñas, C., Rey, E., Chamari, K., & Orhant, E. (2015). The effects of a congested fixture period on physical performance, technical activity and injury rate during matches in a professional soccer team. *British journal of sports medicine*, 49(6), 390–394. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2012-091290>
- Dern, R. J., Levene, J. M., & Blair, H. A. (1947). Forces exerted at different velocities in human arm movements. *The American journal of physiology*, 151(2), 415–437. <https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1947.151.2.415>
- Díaz-Seradilla, E., Rodríguez-Fernández, A., Rodríguez-Marroyo, J. A., Castillo, D., Raya-González, J., & Villa Vicente, J. G. (2022). Inter- and intra-microcycle external load analysis in female professional soccer players: A playing position approach. *PloS one*, 17(3), e0264908. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0264908>
- Díez, A., Lozano, D., Arjol-Serrano, J. L., Mainer-Pardos, E., Castillo, D., Torrontegui-Duarte, M., Nobari, H., Jaén-Carrillo, D., & Lampre, M. (2021). Influence of contextual factors on physical demands and technical-tactical actions regarding playing position in professional soccer players. *BMC sports science, medicine & rehabilitation*, 13(1), 157. <https://doi.org/10.1186/s13102-021-00386-x>
- Di Prampero, P. E., Botter, A., & Osgnach, C. (2015). The energy cost of sprint running and the role of metabolic power in setting top performances. *European journal of applied physiology*, 115(3), 451–469. <https://doi.org/10.1007/s00421-014-3086-4>
- Di Prampero, P. E., Fusi, S., Sepulcri, L., Morin, J. B., Belli, A., & Antonutto, G. (2005). Sprint running: a new energetic approach. *The Journal of experimental biology*, 208(Pt 14), 2809–2816. <https://doi.org/10.1242/jeb.01700>
- Di Salvo, V., Baron, R., González-Haro, C., Gormasz, C., Pigozzi, F., & Bachl, N. (2010). Sprinting analysis of elite soccer players during European Champions League and UEFA Cup matches. *Journal of Sports Sciences*, 28(14), 1489-1494. <https://doi.org/10.1080/02640414.2010.521166>
- Di Salvo, V., Baron, R., Tschann, H., Montero, F. C., Bachl, N., & Pigozzi, F. (2007). Performance Characteristics According to Playing Position in Elite Soccer. *International Journal of Sports Medicine*, 28(3), 222-227. <https://doi.org/10.1055/s-2006-924294>

- Di Salvo, V., Collins, A., McNeill, B., & Cardinale, M. (2006). Validation of Prozone[®] : A new video-based performance analysis system. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 6(1), 108-119. <https://doi.org/10.1080/24748668.2006.11868359>
- Di Salvo, V., Gregson, W., Atkinson, G., Tordoff, P., & Drust, B. (2009). Analysis of High Intensity Activity in Premier League Soccer. *International Journal of Sports Medicine*, 30(3), 205-212. <https://doi.org/10.1055/s-0028-1105950>
- Dolci, F., Hart, N. H., Kilding, A. E., Chivers, P., Piggott, B., & Spiteri, T. (2018). Movement Economy in Soccer : Current Data and Limitations. *Sports*, 6(4), 124. <https://doi.org/10.3390/sports6040124>
- Dorn, T. W., Schache, A. G., & Pandy, M. G. (2012). Muscular strategy shift in human running: dependence of running speed on hip and ankle muscle performance. *The Journal of experimental biology*, 215(Pt 11), 1944–1956. <https://doi.org/10.1242/jeb.064527>
- Drust, B., Atkinson, G., & Reilly, T. (2007). Future Perspectives in the Evaluation of the Physiological Demands of Soccer. *Sports Medicine*, 37(9), 783-805. <https://doi.org/10.2165/00007256-200737090-00003>
- Duclay, J., & Martin, A. (2005). Evoked H-reflex and V-wave responses during maximal isometric, concentric, and eccentric muscle contraction. *Journal of neurophysiology*, 94(5), 3555–3562. <https://doi.org/10.1152/jn.00348.2005>
- Duffield, R., Reid, M., Baker, J., & Spratford, W. (2010). Accuracy and reliability of GPS devices for measurement of movement patterns in confined spaces for court-based sports. *Journal of science and medicine in sport*, 13(5), 523–525. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2009.07.003>
- Duthie, G. M., Pyne, D. B., Marsh, D. J., & Hooper, S. L. (2006). Sprint patterns in rugby union players during competition. *Journal of strength and conditioning research*, 20(1), 208–214. <https://doi.org/10.1519/R-16784.1>
- Dwyer, D. B., & Gabbett, T. J. (2012). Global positioning system data analysis: velocity ranges and a new definition of sprinting for field sport athletes. *Journal of strength and conditioning research*, 26(3), 818–824. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3182276555>
- Edgecomb, S. J., & Norton, K. I. (2006). Comparison of global positioning and computer-based tracking systems for measuring player movement distance during Australian football. *Journal of science and medicine in sport*, 9(1-2), 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2006.01.003>
- Edman, K. A. (1988). Double-hyperbolic force-velocity relation in frog muscle fibres. *The Journal of Physiology*, 404(1), 301-321. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1988.sp017291>

- Edman K. A. (1979). The velocity of unloaded shortening and its relation to sarcomere length and isometric force in vertebrate muscle fibres. *The Journal of physiology*, 291, 143–159. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1979.sp012804>
- 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. <https://doi.org/10.1080/02640414.2012.665940>
- Feng, S., Jokinen, A., Milner, C., & Ochieng, W. Y. (2013). New methods for dual constellation single receiver positioning and integrity monitoring. *Geo-spatial Information Science*, 16(3), 201-209. <https://doi.org/10.1080/10095020.2013.834112>
- Fenn, W. O., & Marsh, B. S. (1935). Muscular force at different speeds of shortening. *The Journal of physiology*, 85(3), 277–297. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1935.sp003318>
- Fernández-Galván, L. M., Boullosa, D., Jiménez-Reyes, P., Cuadrado-Peñafiel, V., & Casado, A. (2021). Examination of the Sprinting and Jumping Force-Velocity Profiles in Young Soccer Players at Different Maturational Stages. *International journal of environmental research and public health*, 18(9), 4646. <https://doi.org/10.3390/ijerph18094646>
- FIFA. (2015). FIFA and IFAB to develop global standard for electronic performance and tracking systems.
- FIFA. (2019). Physical analysis of the FIFA women's world cup France 2019. Available at: <https://www.fifa.com/tournaments/womens/womensworldcup/france2019/news/physical-analysis-of-france-2019-shows-increase-in-speed-and-intensity>
- FIFA. (2021). The Football Landscape. <https://publications.fifa.com/en/vision-report-2021/the-football-landscape>.
- Fornasier-Santos, C., Arnould, A., Jusseaume, J., Millot, B., Guilhem, G., Couturier, A., Samozino, P., Slawinski, J., & Morin, J. B. (2022). Sprint Acceleration Mechanical Outputs Derived from Position- or Velocity-Time Data: A Multi-System Comparison Study. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22(22), 8610. <https://doi.org/10.3390/s22228610>
- Furusawa, K., Hill, A. V., & Parkinson, J. L. (1927). The dynamics of" sprint" running. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character*, 102(713), 29-42.
- Gasser, H. S., & Hill, A. V. (1924). The dynamics of muscular contraction. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing papers of a biological character*, 96(678), 398-437. <https://doi.org/10.1098/rspb.1924.0035>

- Goto, H., Morris, J. G., & Nevill, M. E. (2013). Match analysis of U9 and U10 english premier league academy soccer players using a global positioning system: relevance for talent identification and development. *Journal of strength and conditioning research*, 29(4), 954–963. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3182a0d751>
- 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. <https://doi.org/10.3389/fspor.2021.604605>
- Gülch R. W. (1994). Force-velocity relations in human skeletal muscle. *International journal of sports medicine*, 15 Suppl 1, S2–S10. <https://doi.org/10.1055/s-2007-1021103>
- Hall, S. J. (2007) Kinetic concepts for analyzing human motion (2019). Basic Biomechanics, 8e. McGraw
- 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. <https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1868669>
- Harman, E. A., Rosenstein, M. T., Frykman, P., Rosenstein, R. M., & Kraemer, W. J. (1991). Estimation of Human Power Output from Vertical Jump. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 5(3), 116-120.
- Harris, N. K., Cronin, J. B., Hopkins, W. G., & Hansen, K. T. (2008). Relationship between sprint times and the strength/power outputs of a machine squat jump. *Journal of strength and conditioning research*, 22(3), 691–698. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31816d8d80>
- Harrison, A. J., Jensen, R. L., & Donoghue, O. (2005). A comparison of laser and video techniques for determining displacement and velocity during running. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*, 9(4), 219-231. https://doi.org/10.1207/s15327841mpee0904_2
- Haugen, T. A., Breitschädel, F., & Samozino, P. (2020a). Power-Force-Velocity Profiling of Sprinting Athletes: Methodological and Practical Considerations When Using Timing Gates. *Journal of strength and conditioning research*, 34(6), 1769–1773. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002890>
- Haugen, T. A., Breitschädel, F., & Seiler, S. (2020b). Sprint mechanical properties in soccer players according to playing standard, position, age and sex. *Journal of sports sciences*, 38(9), 1070–1076. <https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1741955>

- Haugen, T. A., Breitschädel, F., & Seiler, S. (2019). Sprint mechanical variables in elite athletes: Are force-velocity profiles sport specific or individual?. *PloS one*, 14(7), e0215551. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215551>
- Haugen, T., & Buchheit, M. (2016). Sprint Running Performance Monitoring: Methodological and Practical Considerations. *Sports medicine*, 46(5), 641–656. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0446-0>
- Haugen, T. A., Tønnessen, E., Hisdal, J., & Seiler, S. (2014). The Role and Development of Sprinting Speed in Soccer. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(3), 432-441. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2013-0121>
- Haugen, T. A., Tønnessen, E., & Seiler, S. (2012). The difference is in the start: impact of timing and start procedure on sprint running performance. *Journal of strength and conditioning research*, 26(2), 473–479. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318226030b>
- Haugen, T. A., Tønnessen, E., & Seiler, S. (2013). Anaerobic Performance Testing of Professional Soccer Players 1995–2010. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 8(2), 148-156. <https://doi.org/10.1123/ijspp.8.2.148>
- Haugen, T. A., Tønnessen, E., Svendsen, I. S., & Seiler, S. (2014). Sprint time differences between single- and dual-beam timing systems. *Journal of strength and conditioning research*, 28(8), 2376–2379. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000415>
- Helene, O., & Yamashita, M. T. (2010). The force, power, and energy of the 100 meter sprint. *American Journal of Physics*, 78(3), 307-309.
- 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. <https://doi.org/10.1080/02640414.2014.898854>
- Herzog W. (2000). Muscle properties and coordination during voluntary movement. *Journal of sports sciences*, 18(3), 141–152. <https://doi.org/10.1080/026404100365045>
- Hill, A. V. (1938). The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. *Proceedings of the Royal Society of London*, 126(843), 136-195. <https://doi.org/10.1098/rspb.1938.0050>
- Hill, A. V. (1922). The maximum work and mechanical efficiency of human muscles, and their most economical speed. *The Journal of Physiology*, 56(1-2), 19-41. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1922.sp001989>

Hills, S. P., Barrett, S., Feltbower, R. G., Barwood, M. J., Radcliffe, J. N., Cooke, C. B., Kilduff, L. P., Cook, C. J., & Russell, M. (2019). A match-day analysis of the movement profiles of substitutes from a professional soccer club before and after pitch-entry. *PloS one*, 14(1), e0211563. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211563>

Hoppe, M. W., Baumgart, C., Polglaze, T., & Freiwald, J. (2018). Validity and reliability of GPS and LPS for measuring distances covered and sprint mechanical properties in team sports. *PloS one*, 13(2), 1-21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192708>

Huggins, R. A., Giersch, G. E. W., Belval, L. N., Benjamin, C. L., Curtis, R. M., Sekiguchi, Y., Peltonen, J., & Casa, D. J. (2020). The Validity and Reliability of Global Positioning System Units for Measuring Distance and Velocity During Linear and Team Sport Simulated Movements. *Journal of strength and conditioning research*, 34(11), 3070–3077. <https://doi.org/10.1519/JSC.00000000000003787>

Ishii, T., Masuda, T., Kurogi, H., Yabuno, S., & Yamamoto, H. (2002). The Distance Covered Of Soccer And Rugby Referees During The Match Using A Mobile "GPS".

Jaskólska, A., Goossens, P., Veenstra, B., Jaskólski, A., & Skinner, J. S. (1999a). Treadmill measurement of the force-velocity relationship and power output in subjects with different maximal running velocities. *Sports Medicine Training and Rehabilitation*, 8, 347-358.

Jaskólska, A., Goossens, P., Veenstra, B., Jaskólski, A., & Skinner, J. S. (1999b). Comparison of treadmill and cycle ergometer measurements of force-velocity relationships and power output. *International journal of sports medicine*, 20(3), 192-197.

Jennings, D., Cormack, S., Coutts, A. J., Boyd, L., & Aughey, R. J. (2010). The Validity and Reliability of GPS Units for Measuring Distance in Team Sport Specific Running Patterns. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 5(3), 328-341. <https://doi.org/10.1123/ijsp.5.3.328>

Jiménez-Reyes, P., Cross, M., Ross, A., Samozino, P., Brughelli, M., Gill, N., & Morin, J. B. (2019). Changes in mechanical properties of sprinting during repeated sprint in elite rugby sevens athletes. *European journal of sport science*, 19(5), 585–594. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1542032>

Jiménez-Reyes, P., Garcia-Ramos, A., Párraga-Montilla, J. A., Morcillo-Losa, J. A., Cuadrado-Peñafiel, V., Castaño-Zambudio, A., Samozino, P., & Morin, J. B. (2020). Seasonal Changes in the Sprint Acceleration Force-Velocity Profile of Elite Male Soccer Players. *Journal of strength and conditioning research*, 36(1), 70–74. <https://doi.org/10.1519/JSC.00000000000003513>

Jiménez-Reyes, P., García-Ramos, A., Cuadrado-Peñafiel, V., Párraga-Montilla, J. A., Morcillo-Losa, J. A., Samozino, P., & Morin, J. B. (2019). Differences in Sprint Mechanical Force-Velocity Profile Between

Trained Soccer and Futsal Players. *International journal of sports physiology and performance*, 14(4), 478–485. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0402>

Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., García-Ramos, A., Cuadrado-Peñafiel, V., Brughelli, M., & Morin, J. B. (2018). Relationship between vertical and horizontal force-velocity-power profiles in various sports and levels of practice. *PeerJ*, 6, e5937. <https://doi.org/10.7717/peerj.5937>

Johnston, R. J., Watsford, M. L., Kelly, S. J., Pine, M. J., & Spurrs, R. W. (2014). Validity and Interunit Reliability of 10 Hz and 15 Hz GPS Units for Assessing Athlete Movement Demands. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(6), 1649-1655. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000000323>

Johnston, R. J., Watsford, M. L., Pine, M. J., Spurrs, R. W., Murphy, A. J., & Pruyn, E. C. (2012). The Validity and Reliability of 5-hz Global Positioning System Units to Measure Team Sport Movement Demands. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(3), 758-765. <https://doi.org/10.1519/jsc.0b013e318225f161>

Julian, R., Page, R. M., & Harper, L. D. (2021). The Effect of Fixture Congestion on Performance During Professional Male Soccer Match-Play : A Systematic Critical Review with Meta-Analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 51(2), 255-273. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01359-9>

Kelly, V., Scott, M., Scott, T., (2014). The validity and reliability of global positioning systems in team sport : A brief review. *ASCA Journal of Australian Strength and Conditioning*, 22(5), 186-190.

Kleissen, R. F., Buurke, J. H., Harlaar, J., & Zilvold, G. (1998). Electromyography in the biomechanical analysis of human movement and its clinical application. *Gait & posture*, 8(2), 143–158. [https://doi.org/10.1016/s0966-6362\(98\)00025-3](https://doi.org/10.1016/s0966-6362(98)00025-3)

Komi P. (1993). *Strength and Power in Sport: Olympic Encyclopedia of Sports Medicine*: Wiley.

Krustrup, P., Mohr, M., Amstrup, T., Rysgaard, T., Johansen, J., Steensberg, A., Pedersen, P. K., & Bangsbo, J. (2003). The yo-yo intermittent recovery test: physiological response, reliability, and validity. *Medicine and science in sports and exercise*, 35(4), 697–705. <https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000058441.94520.32>

Lacome, M., Owen, C., Peeters, A., Piscione, J., Lemeur, Y., & Leduc, C. (2020). Force velocity profiling with GPS : is it reliable ? *Sport Perform Sciences Reports*, 1, 5-7.

Lacome, M., Peeters, A., Mathieu, B., Bruno, M., Christopher, C., & Piscione, J. (2019). Can we use GPS for assessing sprinting performance in rugby sevens? A concurrent validity and between-device reliability study. *Biology of sport*, 36(1), 25–29. <https://doi.org/10.5114/biolport.2018.78903>

- Lago C. (2009). The influence of match location, quality of opposition, and match status on possession strategies in professional association football. *Journal of sports sciences*, 27(13), 1463–1469. <https://doi.org/10.1080/02640410903131681>
- Lago-Peñas, C., Lorenzo-Martinez, M., López-Del Campo, R., Resta, R., & Rey, E. (2022). Evolution of physical and technical parameters in the Spanish *LaLiga* 2012-2019. *Science & medicine in football*, 7(1), 41–46. <https://doi.org/10.1080/24733938.2022.2049980>
- Lahti, J., Jiménez-Reyes, P., Cross, M. R., Samozino, P., Chassaing, P., Simond-Cote, B., Ahtiainen, J., & Morin, J. B. (2020). Individual Sprint Force-Velocity Profile Adaptations to In-Season Assisted and Resisted Velocity-Based Training in Professional Rugby. *Sports*, 8(5), 74. <https://doi.org/10.3390/sports8050074>
- Lahti, J., Mendiguchía, J., Ahtiainen, J. P., Anula, L., Kononen, T., Kujala, M., Matinlauri, A., Peltonen, V., Thibault, M., Toivonen, R., Édouard, P., & Morin, J. (2020). Multifactorial Individualised Programme for Hamstring Muscle injury risk Reduction in Professional Football : Protocol for a prospective cohort study. *BMJ open sport and exercise medicine*, 6(1), e000758. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2020-000758>
- Larousse. (2022). *Dictionnaire Larousse*.
- Latash, M. L. (2012). *Fundamentals of motor control*. Academic Press.
- Lindberg, K., Solberg, P., Rønnestad, B. R., Frank, M. T., Larsen, T., Abusdal, G., Berntsen, S., Paulsen, G., Sveen, O., Seynnes, O., & Bjørnsen, T. (2021). Should we individualize training based on force-velocity profiling to improve physical performance in athletes?. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 31(12), 2198–2210. <https://doi.org/10.1111/sms.14044>
- Little, T., & Williams, A. G. (2005). Specificity of acceleration, maximum speed, and agility in professional soccer players. *Journal of strength and conditioning research*, 19(1), 76–78. <https://doi.org/10.1519/14253.1>
- Lochbaum, M., Stoner, E., Hefner, T., Cooper, S., Lane, A. M., & Terry, P. C. (2022). Sport Psychology and Performance Meta-analyses : A Systematic Review of the literature. *PlosS one*, 17(2), e0263408. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263408>
- López-Sagarra, A., Baena-Raya, A., Casimiro-Artés, M. Á., Granero-Gil, P., & Rodríguez-Pérez, M. A. (2022). Seasonal Changes in the Acceleration–Speed Profile of Elite Soccer Players : A Longitudinal study. *Applied sciences*, 12(24), 12987. <https://doi.org/10.3390/app122412987>

- Lorenzo-Martínez, M., Padrón-Cabo, A., Rey, E., & Memmert, D. (2021). Analysis of Physical and Technical Performance of Substitute Players in Professional Soccer. *Research quarterly for exercise and sport*, 92(4), 599–606. <https://doi.org/10.1080/02701367.2020.1755414>
- Lorenzo-Martínez, M., Rey, E., & Padrón-Cabo, A. (2020). The effect of age on between-match physical performance variability in professional soccer players. *Research in Sports Medicine (Print)*, 28(3), 351–359. <https://doi.org/10.1080/15438627.2019.1680985>
- Los Arcos, A., Yanci, J., Mendiguchia, J., Salinero, J. J., Brughelli, M., & Castagna, C. (2014). Short-term training effects of vertically and horizontally oriented exercises on neuromuscular performance in professional soccer players. *International journal of sports physiology and performance*, 9(3), 480–488. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2013-0063>
- Loturco, I., D'Angelo, R. A., Fernandes, V., Gil, S., Kobal, R., Cal Abad, C. C., Kitamura, K., & Nakamura, F. Y. (2015). Relationship between sprint ability and loaded/unloaded jump tests in elite sprinters. *Journal of strength and conditioning research*, 29(3), 758–764. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000660>
- MacIntosh B. R., Holash R. J., (2000). Power output and force-velocity properties of muscle. *Biomechanics and Biology of movement*, 193–210.
- MacLeod, H., Morris, J., Nevill, A., & Sunderland, C. (2009). The validity of a non-differential global positioning system for assessing player movement patterns in field hockey. *Journal of Sports Sciences*, 27(2), 121–128. <https://doi.org/10.1080/02640410802422181>
- Maffiuletti, N. A., Martin, A., Babault, N., Pensini, M., Lucas, B., & Schieppati, M. (2001). Electrical and mechanical H(max)-to-M(max) ratio in power- and endurance-trained athletes. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 90(1), 3–9. <https://doi.org/10.1152/jappl.2001.90.1.3>
- Malina, R. M., Martinho, D. V., Valente-Dos-Santos, J., Coelho-E-Silva, M. J., & Koziel, S. M. (2021). Growth and Maturity Status of Female Soccer Players: A Narrative Review. *International journal of environmental research and public health*, 18(4), 1448. <https://doi.org/10.3390/ijerph18041448>
- Malone, J. J., Lovell, R., Varley, M. C., & Coutts, A. J. (2017). Unpacking the Black Box : Applications and Considerations for Using GPS Devices in Sport. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(Suppl 2), S218–S226. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0236>
- Malone, S., Owen, A., Newton, M., Mendes, B., Tiernan, L., Hughes, B., & Collins, K. (2017). Wellbeing perception and the impact on external training output among elite soccer players. *Journal of science and medicine in sport*, 21(1), 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2017.03.019>

- Mara, J. K., Thompson, K. G., & Pumpa, K. L. (2016). Physical and Physiological Characteristics of Various-Sided Games in Elite Women's Soccer. *International journal of sports physiology and performance*, 11(7), 953–958. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0087>
- Marcote-Pequeño, R., García-Ramos, A., Cuadrado-Peñafiel, V., González-Hernández, J. M., Gómez, M. Á., & Jiménez-Reyes, P. (2018). Association Between the Force-Velocity Profile and Performance Variables Obtained in Jumping and Sprinting in Elite Female Soccer Players. *International journal of sports physiology and performance*, 14(2), 209–215. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0233>
- Martínez-Hernández, D., Quinn, M., & Jones, P. A. (2023). Most common movements preceding goal scoring situations in female professional soccer. *Science & medicine in football*, 1-9. <https://doi.org/10.1080/24733938.2023.2214106>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2014.10.001>
- Martínez-Lagunas V & Scott D. (2016) *Physical Analysis of the FIFA Women's World Cup Canada 2015™*. Zurich: FIFA.
- McMahon, T. A. (1984). Muscles, reflexes, and locomotion. (Vol. 10). Princeton University Press.
- Mendez-Villanueva, A., Buchheit, M., Kuitunen, S., Douglas, A., Peltola, E., & Bourdon, P. (2011). Age-related differences in acceleration, maximum running speed, and repeated-sprint performance in young soccer players. *Journal of sports sciences*, 29(5), 477–484. <https://doi.org/10.1080/02640414.2010.536248>
- Mendez-Villanueva, A., Buchheit, M., Kuitunen, S., Poon, T. K., Simpson, B., & Peltola, E. (2010). Is the relationship between sprinting and maximal aerobic speeds in young soccer players affected by maturation?. *Pediatric exercise science*, 22(4), 497–510. <https://doi.org/10.1123/pes.22.4.497>
- Mendiguchia, J., Edouard, P., Samozino, P., Brughelli, M., Cross, M., Ross, A., Gill, N., & Morin, J. B. (2016). Field monitoring of sprinting power-force-velocity profile before, during and after hamstring injury: two case reports. *Journal of sports sciences*, 34(6), 535–541. <https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1122207>
- Mendiguchia, J., Samozino, P., Martinez-Ruiz, E., Brughelli, M., Schmikli, S., Morin, J. B., & Mendez-Villanueva, A. (2014). Progression of mechanical properties during on-field sprint running after returning to sports from a hamstring muscle injury in soccer players. *International journal of sports medicine*, 35(8), 690–695. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1363192>

- Meylan, C. M., Cronin, J., Hopkins, W. G., & Oliver, J. (2014). Adjustment of measures of strength and power in youth male athletes differing in body mass and maturation. *Pediatric exercise science*, 26(1), 41–48. <https://doi.org/10.1123/pes.2013-0029>
- Miguel, M., Oliveira, R., Loureiro, N., García-Rubio, J., & Ibáñez, S. J. (2021). Load Measures in Training/Match Monitoring in Soccer : A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 2721. <https://doi.org/10.3390/ijerph18052721>
- Mohr, M., Bangsbo, J., & Krstrup, P. (2003). Match performance of high-standard soccer players with special reference to development of fatigue. *Journal of Sports Sciences*, 21(7), 519-528. <https://doi.org/10.1080/0264041031000071182>
- Mohr, M., Krstrup, P., & Bangsbo, J. (2005). Fatigue in soccer : A brief review. *Journal of Sports Sciences*, 23(6), 593-599. <https://doi.org/10.1080/02640410400021286>
- Mohr, M., Nybo, L., Grantham, J., & Racinais, S. (2012). Physiological responses and physical performance during football in the heat. *PloS one*, 7(6), e39202. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0039202>
- Morin, J. B., Bourdin, M., Edouard, P., Peyrot, N., Samozino, P., & Lacour, J. R. (2012). Mechanical determinants of 100-m sprint running performance. *European Journal of Applied Physiology*, 112(11), 3921-3930. <https://doi.org/10.1007/s00421-012-2379-8>
- Morin, J. B., Edouard, P., & Samozino, P. (2011a). Technical Ability of Force Application as a Determinant Factor of Sprint Performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 43(9), 1680-1688. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e318216ea37>
- Morin, J. B., Jeannin, T., Chevallier, B., & Belli, A. (2006). Spring-mass model characteristics during sprint running: correlation with performance and fatigue-induced changes. *International journal of sports medicine*, 27(2), 158–165. <https://doi.org/10.1055/s-2005-837569>
- Morin, J. B., Mat, Y. L., Osgnach, C., Barnabò, A., Pilati, A., Samozino, P., & Di Prampero, P. E. (2021). Individual acceleration-speed profile in-situ : A proof of concept in professional football players. *Journal of Biomechanics*, 123, 110524. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110524>
- Morin, J. B., Petrakos, G., Jiménez-Reyes, P., Brown, S. R., Samozino, P., & Cross, M. R. (2016). Very-Heavy Sled Training for Improving Horizontal-Force Output in Soccer Players. *International journal of sports physiology and performance*, 12(6), 840–844. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0444>

- Morin, J. B., & Samozino, P. (2016). Interpreting Power-Force-Velocity Profiles for Individualized and Specific Training. *International journal of sports physiology and performance*, 11(2), 267–272. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0638>
- Morin, J. B., Samozino, P., Bonnefoy, R., Edouard, P., & Belli, A. (2010). Direct measurement of power during one single sprint on treadmill. *Journal of biomechanics*, 43(10), 1970–1975. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.03.012>
- Morin, J. B., Samozino, P., Edouard, P., & Tomazin, K. (2011b). Effect of fatigue on force production and force application technique during repeated sprints. *Journal of biomechanics*, 44(15), 2719–2723. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2011.07.020>
- Morin, J. B., Samozino, P., Murata, M., Cross, M. R., & Nagahara, R. (2019). A simple method for computing sprint acceleration kinetics from running velocity data: Replication study with improved design. *Journal of biomechanics*, 94, 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.07.020>
- 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. <https://doi.org/10.1080/02640410802428071>
- Nagahara, R., Botter, A., Rejc, E., Koido, M., Shimizu, T., Samozino, P., & Morin, J. B. (2017). Concurrent Validity of GPS for Deriving Mechanical Properties of Sprint Acceleration. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(1), 129–132. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0566>
- Nagahara, R., Matsubayashi, T., Matsuo, A., & Zushi, K. (2014). Kinematics of transition during human accelerated sprinting. *Biology open*, 3(8), 689–699. <https://doi.org/10.1242/bio.20148284>
- 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. *Journal of strength and conditioning research*, 31(7), 1802–1810. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001659>
- Nassis, G. P., Massey, A., Jacobsen, P., Brito, J., Morten, B., Randers, M., Castagna, C., Mohr, M., & Krstrup, P. (2020). Elite football of 2030 will not be the same as that of 2020: Preparing players, coaches, and support staff for the evolution. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 30(6), 962–964. <https://doi.org/10.1111/sms.13681>
- Neptune, R. R., & Herzog, W. (1999). The association between negative muscle work and pedaling rate. *Journal of biomechanics*, 32(10), 1021–1026. [https://doi.org/10.1016/s0021-9290\(99\)00100-1](https://doi.org/10.1016/s0021-9290(99)00100-1)

- Neptune, R. R., Kautz, S. A., & Hull, M. L. (1997). The effect of pedaling rate on coordination in cycling. *Journal of biomechanics*, 30(10), 1051–1058. [https://doi.org/10.1016/s0021-9290\(97\)00071-7](https://doi.org/10.1016/s0021-9290(97)00071-7)
- Newton, I. (1687). *Philosophiæ naturalis principia mathematica*. « Principes mathématiques de la philosophie naturelle »
- Ohashi, J.T., H., Isokawa, M., Suzuki, S. (1987). Measuring of movement speeds in soccer match play. *Science and Football (Routledge Revivals)*, London, 329-333.
- Oliva-Lozano, J. M., Fortes, V., Krstrup, P., & Muyor, J. M. (2020). Acceleration and sprint profiles of professional male football players in relation to playing position. *PloS one*, 15(8), e0236959. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236959>
- Osgnach, C., Poser, S., Bernardini, R., Rinaldo, R., & di Prampero, P. E. (2010). Energy cost and metabolic power in elite soccer: a new match analysis approach. *Medicine and science in sports and exercise*, 42(1), 170–178. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181ae5cfd>
- Padrón-Cabo, A., Rey, E., Vidal, B., & Garcia-Núñez, J. (2018). Work-rate Analysis of Substitute Players in Professional Soccer : Analysis of Seasonal Variations. *Journal of Human Kinetics*, 65, 165-174. <https://doi.org/10.2478/hukin-2018-0025>
- Park, L. A. F., Scott, D., & Lovell, R. (2019). Velocity zone classification in elite women's football : Where do we draw the lines ? *Science & medicine in football*, 3(1), 21-28. <https://doi.org/10.1080/24733938.2018.1517947>
- Penasso, H., & Thaller, S. (2018). Model-based analysis of fatigued human knee extensors : Effects of isometrically induced fatigue on Hill-type model parameters and ballistic contractions. *European journal of applied physiology*, 118(7), 1447–1461. <https://doi.org/10.1007/s00421-018-3875-2>
- Perrine, J. J., & Edgerton, V. R. (1978). Muscle force-velocity and power-velocity relationships under isokinetic loading. *Medicine and science in sports*, 10(3), 159–166.
- Petrakos, G., Morin, J. B., & Egan, B. (2015). Resisted Sled Sprint Training to Improve Sprint Performance: A Systematic Review. *Sports medicine*, 46(3), 381–400. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0422-8>
- Pettersen, S. A., Johansen, H. D., Baptista, I. A. M., Halvorsen, P., & Johansen, D. (2018). Quantified Soccer Using Positional Data: A Case Study. *Frontiers in physiology*, 9, 866. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00866>

- Pinot, J., & Grappe, F. (2011). The record power profile to assess performance in elite cyclists. *International journal of sports medicine*, 32(11), 839–844. <https://doi.org/10.1055/s-0031-1279773>
- Pons, E., García Calvo, T., Cos, F., Resta, R., Blanco, H., López-Del Campo, R., Díaz-García, J., & Pulido-González, J. J. (2021). Integrating video tracking and GPS to quantify accelerations and decelerations in elite soccer. *Scientific Reports*, 11(1), 18531. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97903-2>
- Poulos, N., Kuitunen, S., & Buchheit, M., (2010). Effect of preload squatting on sprint performance in adolescent athletes. *New Studies in Athletics*, 25, 95-103.
- Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Saez De Villareal, E., Couturier, A., Samozino, P., & Morin, J. B. (2015). Sprint mechanics in world-class athletes : a new insight into the limits of human locomotion. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 25(5), 583-594. <https://doi.org/10.1111/sms.12389>
- Radzimiński, Ł., & Jastrzębski, Z. (2021). Evolution of physical performance in professional soccer across four consecutive seasons. *Baltic Journal of Health and Physical Activity*, 13(3), 79-85. <https://doi.org/10.29359/bjhpa.13.3.10>
- Rahmani A., Belli A., Kostka T., Dalleau G., Bonnefoy M., Lacour J.-R., (1999). Evaluation of Knee Extensor Muscles under Non-Isokinetic Conditions in Elderly Subjects. *Journal Applied Biomechanics*, 15, 337–344.
- Rahmani, A., Viale, F., Dalleau, G., & Lacour, J. R. (2001). Force/velocity and power/velocity relationships in squat exercise. *European journal of applied physiology*, 84(3), 227–232. <https://doi.org/10.1007/PL00007956>
- Ramos, G. P., Nakamura, F. Y., Penna, E. M., Wilke, C. F., Pereira, L. A., Loturco, I., Capelli, L., Mahseredjian, F., Silami-Garcia, E., & Coimbra, C. C. (2019). Activity Profiles in U17, U20, and Senior Women's Brazilian National Soccer Teams During International Competitions: Are There Meaningful Differences?. *Journal of strength and conditioning research*, 33(12), 3414–3422. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002170>
- Rampinini, E., Bishop, D. T., Marcora, S. M., Ferrari Bravo, D., Sassi, R., & Impellizzeri, F. M. (2007b). Validity of Simple Field Tests as Indicators of Match-Related Physical Performance in Top-Level Professional Soccer Players. *International Journal of Sports Medicine*, 28(3), 228-235. <https://doi.org/10.1055/s-2006-924340>

- Rampinini, E., Coutts, A. J., Castagna, C., Sassi, R., & Impellizzeri, F. M. (2007a). Variation in Top Level Soccer Match Performance. *International Journal of Sports Medicine*, 28(12), 1018-1024. <https://doi.org/10.1055/s-2007-965158>
- Rampinini, E., Impellizzeri, F. M., Castagna, C., Abt, G., Chamari, K., Sassi, A., & Marcora, S. M. (2007c). Factors influencing physiological responses to small-sided soccer games. *Journal of sports sciences*, 25(6), 659–666. <https://doi.org/10.1080/02640410600811858>
- Rampinini, E., Impellizzeri, F. M., Castagna, C., Coutts, A. J., & Wisløff, U. (2009a). Technical performance during soccer matches of the Italian Serie A league: effect of fatigue and competitive level. *Journal of science and medicine in sport*, 12(1), 227–233. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2007.10.002>
- Randell, A. D., Cronin, J. B., Keogh, J. W., & Gill, N. D. (2010). Transference of strength and power adaptation to sports performance—horizontal and vertical force production. *Strength & Conditioning Journal*, 32(4), 100-106.
- Reilly, T., Bangsbo, J., & Franks, A. (2000). Anthropometric and physiological predispositions for elite soccer. *Journal of sports sciences*, 18(9), 669–683. <https://doi.org/10.1080/02640410050120050>
- Reilly, T., Drust, B., & Clarke, N. (2008). Muscle Fatigue during Football Match-Play. *Sports Medicine*, 38(5), 357-367. <https://doi.org/10.2165/00007256-200838050-00001>
- Reynolds, J. F., Connor, M., Jamil, M., & Beato, M. (2021). Quantifying and Comparing the Match Demands of U18, U23, and 1ST Team English Professional Soccer Players. *Frontiers in Physiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.706451>
- Ritchie J. M., Wilkie D. R., (1958) ; The dynamics of muscular contraction. *The Journal of physiology* 143, 104–13.
- Rivilla-García, J., Calvo, L. C., Jiménez-Rubio, S., Paredes-Hernández, V., Muñoz, A., van den Tillaar, R., & Navandar, A. (2019). Characteristics of Very High Intensity Runs of Soccer Players in Relation to their Playing Position and Playing Half in the 2013-14 Spanish La Liga Season. *Journal of human kinetics*, 66, 213–222. <https://doi.org/10.2478/hukin-2018-0058>
- Roe, G., Darrall-Jones, J., Black, C., Shaw, W., Till, K., & Jones, B. (2017). Validity of 10-HZ GPS and Timing Gates for Assessing Maximum Velocity in Professional Rugby Union Players. *International journal of sports physiology and performance*, 12(6), 836–839. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0256>

- Romero-Franco, N., Jiménez-Reyes, P., Castaño-Zambudio, A., Capelo-Ramírez, F., Rodríguez-Juan, J. J., González-Hernández, J., Toscano-Bendala, F. J., Cuadrado-Peñafiel, V., & Balsalobre-Fernández, C. (2017). Sprint performance and mechanical outputs computed with an iPhone app: Comparison with existing reference methods. *European journal of sport science*, 17(4), 386–392. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1249031>
- Runacres, A., Bezodis, N. E., Mackintosh, K. A., & McNarry, M. A. (2019). The reliability of force-velocity-power profiling during over-ground sprinting in children and adolescents. *Journal of Sports Sciences*, 37(18), 2131–2137. <https://doi.org/10.1080/02640414.2019.1622316>
- Samozino, P. (2005). Déterminants mécaniques et musculaires de la relation puissance-fréquence lors de sprint sur cyclo-ergomètre. *Mémoire Master 2 Recherche*, Université de Saint-Etienne.
- Samozino, P., Horvais, N., & Hintzy, F. (2007). Why does power output decrease at high pedaling rates during sprint cycling?. *Medicine and science in sports and exercise*, 39(4), 680–687. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3180315246>
- Samozino, P., Morin, J. B., Hintzy, F., & Belli, A. (2008). A simple method for measuring force, velocity and power output during squat jump. *Journal of Biomechanics*, 41(14), 2940–2945. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.07.028>
- Samozino, P., Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Peyrot, N., Saez de Villarreal, E., & Morin, J. B. (2016). A simple method for measuring power, force, velocity properties, and mechanical effectiveness in sprint running. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 26(6), 648–658. <https://doi.org/10.1111/sms.12490>
- Samozino, P., Rejc, E., Di Prampero, P. E., Belli, A., & Morin, J. B. (2012). Optimal force-velocity profile in ballistic movements--altius: citius or fortius?. *Medicine and science in sports and exercise*, 44(2), 313–322. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31822d757a>
- Sargeant A. J. (2007). Structural and functional determinants of human muscle power. *Experimental physiology*, 92(2), 323–331. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2006.034322>
- Sarmiento, H., Marcelino, R., Anguera, M. T., Campaniço, J., Matos, N., & Leitão, J. C. (2014). Match analysis in football : a systematic review. *Journal of Sports Sciences*, 32(20), 1831–1843. <https://doi.org/10.1080/02640414.2014.898852>
- Schuth, G., Carr, G., Barnes, C., Carling, C., & Bradley, P. S. (2016). Positional interchanges influence the physical and technical match performance variables of elite soccer players. *Journal of sports sciences*, 34(6), 501–508. <https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1127402>

- Schutz, Y., & Chambaz, A. (1997). Could a satellite-based navigation system (GPS) be used to assess the physical activity of individuals on earth?. *European journal of clinical nutrition*, 51(5), 338–339. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1600403>
- Scott, D., Haigh, J., & Lovell, R. (2020). Physical characteristics and match performances in women's international versus domestic-level football players : a 2-year, league-wide study. *Science & medicine in football*, 4(3), 211-215. <https://doi.org/10.1080/24733938.2020.1745265>
- Seck, D., Vandewalle, H., Decrops, N., & Monod, H. (1995). Maximal power and torque-velocity relationship on a cycle ergometer during the acceleration phase of a single all-out exercise. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 70(2), 161-168. <https://doi.org/10.1007/bf00361544>
- Seitz, L. B., Reyes, A., Tran, T. T., Saez de Villarreal, E., & Haff, G. G. (2014). Increases in lower-body strength transfer positively to sprint performance: a systematic review with meta-analysis. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 44(12), 1693–1702. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0227-1>
- Simperingham, K. D., Cronin, J. B., Pearson, S. N., & Ross, A. (2019). Reliability of horizontal force-velocity-power profiling during short sprint-running accelerations using radar technology. *Sports biomechanics*, 18(1), 88–99. <https://doi.org/10.1080/14763141.2017.1386707>
- Slawinski, J., Bonnefoy, A., Ontanon, G., Leveque, J. M., Miller, C., Riquet, A., Chèze, L., & Dumas, R. (2010). Segment-interaction in sprint start: Analysis of 3D angular velocity and kinetic energy in elite sprinters. *Journal of biomechanics*, 43(8), 1494–1502. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.01.044>
- Slawinski, J., Houel, N., Bonnefoy-Mazure, A., Lissajoux, K., Bocquet, V., & Termoz, N. (2017). Mechanics of standing and crouching sprint starts. *Journal of sports sciences*, 35(9), 858–865. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1194525>
- Sleivert, G., & Taingahue, M. (2004). The relationship between maximal jump-squat power and sprint acceleration in athletes. *European journal of applied physiology*, 91(1), 46–52. <https://doi.org/10.1007/s00421-003-0941-0>
- Stølen, T., Chamari, K., Castagna, C., & Wisløff, U. (2005). Physiology of Soccer. *Sports Medicine*, 35(6), 501-536. <https://doi.org/10.2165/00007256-200535060-00004>
- Thorstensson, A., Grimby, G., & Karlsson, J. (1976). Force-velocity relations and fiber composition in human knee extensor muscles. *Journal of applied physiology*, 40(1), 12–16. <https://doi.org/10.1152/jappl.1976.40.1.12>

- Tierney, P. J., Young, A., Clarke, N. D., & Duncan, M. J. (2016). Match play demands of 11 versus 11 professional football using Global Positioning System tracking: Variations across common playing formations. *Human movement science*, 49, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2016.05.007>
- Tønnessen, E., Hem, E., Leirstein, S., Haugen, T. A., & Seiler, S. (2013). Maximal Aerobic Power Characteristics of Male Professional Soccer Players, 1989–2012. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 8(3), 323–329. <https://doi.org/10.1123/ijsp.8.3.323>
- Torreño, N., Munguía-Izquierdo, D., Coutts, A., de Villarreal, E. S., Asian-Clemente, J., & Suarez-Arrones, L. (2016). Relationship Between External and Internal Loads of Professional Soccer Players During Full Matches in Official Games Using Global Positioning Systems and Heart-Rate Technology. *International journal of sports physiology and performance*, 11(7), 940–946. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0252>
- Tufano, J. J., & Amonette, W. E. (2018). Assisted versus resisted training : Which is better for increasing jumping and sprinting ? *Strength and Conditioning Journal*, 40(1), 106–110. <https://doi.org/10.1519/ssc.0000000000000362>
- Uchiyama, T., & Akazawa, K. (1999). Muscle activity-torque-velocity relations in human elbow extensor muscles. *Frontiers of medical and biological engineering : the international journal of the Japan Society of Medical Electronics and Biological Engineering*, 9(4), 305–313.
- Upton D. E. (2011). The effect of assisted and resisted sprint training on acceleration and velocity in Division IA female soccer athletes. *Journal of strength and conditioning research*, 25(10), 2645–2652. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318201be16>
- Vandewalle, H., Peres, G., Heller, J., Panel, J., & Monod, H. (1987a). Force-velocity relationship and maximal power on a cycle ergometer. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 56(6), 650–656. <https://doi.org/10.1007/bf00424805>
- Vandewalle, H., Pérès, G., & Monod, H. (1987b). Standard anaerobic exercise tests. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 4(4), 268–289. <https://doi.org/10.2165/00007256-198704040-00004>
- Varley, M. C., Di Salvo, V., Modonutti, M., Gregson, W., & Mendez-Villanueva, A. (2018). The influence of successive matches on match-running performance during an under-23 international soccer tournament : The necessity of individual analysis. *Journal of Sports Sciences*, 36(5), 585–591. <https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1325511>
- Varley, M. C., & Aughey, R. J. (2013). Acceleration profiles in elite Australian soccer. *International journal of sports medicine*, 34(1), 34–39. <https://doi.org/10.1055/s-0032-1316315>

- Varley, M. C., Fairweather, I. H., & Aughey, R. J. (2012). Validity and reliability of GPS for measuring instantaneous velocity during acceleration, deceleration, and constant motion. *Journal of sports sciences*, 30(2), 121–127. <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.627941>
- Vescovi, J. D., Fernandes, E., & Klas, A. (2021). Physical Demands of Women's Soccer Matches: A Perspective Across the Developmental Spectrum. *Frontiers in sports and active living*, 3, 634696. <https://doi.org/10.3389/fspor.2021.634696>
- Vigne, G., Gaudino, C., Rogowski, I., Alloatti, G., & Hautier, C. (2010). Activity Profile in Elite Italian Soccer Team. *International Journal of Sports Medicine*, 31(5), 304-310. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1248320>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2013.03.016>
- Weyand, P. G., Sandell, R. F., Prime, D. N., & Bundle, M. W. (2010). The biological limits to running speed are imposed from the ground up. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 108(4), 950–961. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00947.2009>
- Weyand, P. G., Sternlight, D. B., Bellizzi, M. J., & Wright, S. (2000). Faster top running speeds are achieved with greater ground forces not more rapid leg movements. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 89(5), 1991–1999. <https://doi.org/10.1152/jappl.2000.89.5.1991>
- Wilkie, D. R., (1949). The relation between force and velocity in human muscle. *The Journal of Physiology*, 110(3-4), 249-280. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1949.sp004437>
- Williams, J. (2011). Women's Football, Europe and Professionalization 1971-2011: Global gendered labor markets. *UEFA Research Grant Programme*
- Williams, J., & Hess, R. (2015). Women, Football and History : International Perspectives. *International Journal of the History of Sport*, 32(18), 2115-2122. <https://doi.org/10.1080/09523367.2015.1172877>
- Wilmore, J. H., & Costill, D. L. (2002). Physiologie du sport et de l'exercice : Adaptations physiologiques à l'exercice physique.
- Wilson, G. J., Walshe, A. D., & Fisher, M. (1997). The development of an isokinetic squat device : reliability and relationship to functional performance. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 75, 455-461.

Yamauchi, J., & Ishii, N. (2007). Relations between force-velocity characteristics of the knee-hip extension movement and vertical jump performance. *Journal of strength and conditioning research*, 21(3), 703–709. <https://doi.org/10.1519/R-20516.1>

Yamauchi, J., Mishima, C., Fujiwara, M., Nakayama, S., & Ishii, N. (2007). Steady-state force-velocity relation in human multi-joint movement determined with force clamp analysis. *Journal of biomechanics*, 40(7), 1433–1442. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2006.06.010>

Zhou, C., Gómez, M. Á., & Lorenzo, A. (2020). The evolution of physical and technical performance parameters in the Chinese Soccer Super League. *Biology of sport*, 37(2), 139–145. <https://doi.org/10.5114/biolsport.2020.93039>

Annexes

Annexe 1 - Validité concurrente du système de mesure
du glucose en continu (CGM) au repos, pendant et
après une activité intermittente à haute intensité

Concurrent Validity of a Continuous Glucose-Monitoring System at Rest and During and Following a High-Intensity Interval Training Session

Pauline Clavel, Eve Tiollier, Cédric Leduc, Marina Fabre, Mathieu Lacome, and Martin Buchheit

Purpose: To assess the concurrent validity of a continuous blood-glucose-monitoring system (CGM) postbreakfast, preexercise, exercise, and postexercise, while assessing the impact of 2 different breakfasts on the observed level of validity. **Methods:** Eight nondiabetic recreational athletes (age = 30.8 [9.5] y; height = 173.6 [6.6] cm; body mass = 70.3 [8.1] kg) took part in the study. Blood glucose concentration was monitored every 10 minutes using both a CGM (FreeStyle Libre, Abbott, France) and finger-prick blood glucose measurements (FreeStyle Optimum) over 4 different periods (postbreakfast, preexercise, exercise, and postexercise). Two different breakfasts (carbohydrates [CHO] and protein oriented) over 2 days (2 × 2 d in total) were used. Statistical analyses included the Bland-Altman method, standardized mean bias (expressed in standardized units), median absolute relative difference, and the Clarke error grid analysis. **Results:** Overall, mean bias was trivial to small at postbreakfast (effect size ± 90% confidence limits: -0.12 ± 0.08), preexercise (-0.08 ± 0.08), and postexercise (0.25 ± 0.14), while moderate during exercise (0.66 ± 0.09). A higher median absolute relative difference was observed during exercise (13.6% vs 7%–9.5% for the other conditions). While there was no effect of the breakfast type on the median absolute relative difference results, error grid analysis revealed a higher value in zone D (ie, clinically unsafe zone) during exercise for CHO (10.5%) compared with protein (1.6%). **Conclusion:** The CGM device examined in this study can only be validly used at rest, after both a CHO and protein-rich breakfast. Using CGM to monitor blood glucose concentration during exercise is not recommended. Moreover, the accuracy decreased when CHO were consumed before exercise.

Keywords: nutrition, technology, sport, protein, carbohydrate

Regulation of blood glucose has first been widely studied from a health perspective. Hyperglycemia, for example, is believed to be an independent risk factor for the development of several diseases, such as type 2 diabetes mellitus¹ and cardiovascular disease.² More recently, the monitoring of blood glucose concentration has also elicited great interest in sport, as hypoglycemia influences both physical and cognitive performances.³

In particular, it is known that at the beginning of exercise or after half time in team sports, athletes experience transient hypoglycemia, which may affect physical and cognitive performance.⁴ Moreover, it has then been shown that a large glycemic variability exists among individuals in the general population.⁵ In addition, similar results have been shown in subelite athletes,⁶ suggesting that providing more individualized guidelines to regulate blood glucose would be beneficial for both health and performance goals.

The emergence of new technologies, such as continuous glucose monitoring (CGM) devices, has allowed blood glucose concentration dynamics to be captured more frequently and less invasively than traditional measures, such as finger pricks. Indeed,

as CGM devices only need to be placed once (usually on the back of the arm), it can be used for several days without disturbing sport practices. So far, these devices have been mainly used by populations with diabetes, but as the technology becomes more accurate, less invasive, and less expensive, their use has increased in other populations and especially in healthy individuals. Therefore, the inclusion of CGM in sport nutritionists' monitoring tool box could help to optimize nutritional strategies before and during exercise and, in turn, improve athletes' performance by preventing hypoglycemia. However, to date, the validity of these new systems at rest or during exercise has been only assessed in patients with diabetes and has shown promising results.⁷ Evidence regarding its relevance with an athletic population is still lacking. Moreover, the ability of such devices to detect potential glucose fluctuations due to different nutritional intakes need to be confirmed.

Therefore, the aim of this study was to assess the concurrent validity of a new CGM device during different periods, that is, pre, during, and after exercise, while assessing the potential impact of different nutritional intakes in the observed level of validity.

Methodology

Study Population

Eight nondiabetic recreational athletes (5 females and 3 males) (age = 30.8 [9.5] y; height = 173.6 [6.6] cm; body mass = 70.3 [8.1] kg) who regularly participate in running and resistance-based training (8 [2] h/wk) were included in the study. An a priori power analysis was conducted using the package *pwr* from R software (version 4.00) for *t* tests for nonparametric data with a significance

Clavel, Leduc, Fabre, and Lacome are with the Performance Dept, Paris Saint-Germain FC, Saint-Germain-en-Laye, France. Clavel, Tiollier, Fabre, Lacome, and Buchheit are with the Laboratory of Sport, Expertise and Performance (EA 7370), French National Inst of Sport (INSEP), Paris, France. Leduc is with the Carnegie Applied Rugby Research (CARR) Centre, Inst for Sport, Physical Activity and Leisure, Carnegie School of Sport, Leeds Beckett University, Leeds, United Kingdom. Buchheit is also with HIITScience, Revelstoke, BC, Canada; the Inst for Health and Sport, Victoria University, Melbourne, VIC, Australia; and Kitman Labs, Performance Research Intelligence Initiative, Dublin, Ireland. Lacome (mathlacome@gmail.com) is corresponding author.

level alpha of .05 a power of 0.8 and add a nonparametric correction of 15%. Result showed a minimal sample of 310 paired observations for 8 participants were necessary. Alcohol intake was prohibited during the study period. Regarding female participants, we ensured they were all within the same menstrual-cycle phase during the study period.

Participants provided informed consent prior to starting the study. Ethics approval was granted before any data collection was undertaken, and the recommendations of the Declaration of Helsinki were respected.

Design

A concurrent validity design was employed to assess the validity of a CGM system against finger-prick measures which was considered as the reference method. Over 2 consecutive weeks, participants took part in 4 nonconsecutive standardized days. Each standardized day was broken down into 4 distinct periods: (1) postbreakfast, which corresponded to the first hour after the end of the breakfast; (2) preexercise, which corresponded to the first hour following the postbreakfast; (3) exercise, which started 2 hours after the end of the breakfast and lasted from the beginning of the warm-up to the end of the workout; and (4) postexercise, which started immediately at the end of the workout and lasted up to 30 minutes later. A detailed outline of the standardized day structure is provided in Figure 1. Nutritional intake during breakfast was manipulated in order to provide either a high carbohydrate (CHO) or protein (PROT) breakfast, to induce different levels of resting and pre-exercise glycemia. Each typical breakfast was repeated twice. Over those standardized days, blood glucose was measured continuously with a CGM, while finger-prick measures were taken every 10 minutes, and day 1 was used for each participant to familiarize with the CGM and ensure calibration (as per manufacturer recommendations) before the experimentation could start. Between days 2 and 13, participants undertook at their convenience the 4 standardized days. They were also instructed to have at least one full day of recovery between each experimental day.

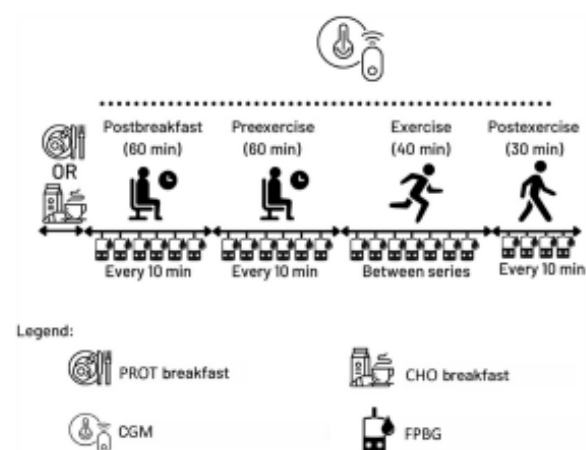


Figure 1 — Schematic representation of the study design. CGM indicates continuous glucose monitoring; CHO, carbohydrates; FPBG, finger-prick blood glucose; PROT, protein.

Methodology

Continuous Glucose Monitoring. Each participant was provided with a CGM system (FreeStyle Libre; Abbott) over the full duration of the study. Each participant inserted a sensor (FreeStyle Libre; Abbott) in their nondominant upper arm (ie, back the triceps brachialis) 1 day before the beginning of the study. Glucose concentration was recorded in the interstitial fluid every minute.

Finger-Prick Blood Glucose. Finger-prick (FreeStyle Optium, Abbott) measures were collected following the procedure described by Gómez et al.⁸ Each sample was immediately analyzed using the FreeStyle Libre reader (FreeStyle Libre Reader, Abbott). The validity and reliability of this device has been previously confirmed.⁹

Breakfast. Two typical breakfasts were employed. The CHO breakfast contained a high proportion of CHO with 1 g/kg of body mass with a ceiling set at 70 g of CHO per breakfast (eg, breakfast contained a mix of orange juice, bread, and jam). The macronutrients and energy were as follow: 65 (7) g of CHO, 9 (1) g of PROT, and 1 (0) g of fat for a total of 311 (31) kcal. The PROT breakfast was isoenergetic compared with CHO (eg, breakfast contained a mix of eggs, ham, and cheese). The macronutrients and energy were as follow: 1 (0) g of CHO, 30 (0) g of PROT, and 23 (0) g of fat for a total of 311 (31) kcal.

Standardized Exercise. Participants completed the 30 to 15 Intermittent Fitness Test as described by Buchheit¹⁰ prior the beginning of the study. The speed (in kilometers per hour) achieved by each participant during the last successfully completed stage of the test was recorded (V_{IFT}) in order to prescribe exercise intensity. The standardized exercise started with a 10-minute low-intensity run (30%–40% of V_{IFT}) and was followed by a high-intensity intermittent training exercise performed outdoor. The trials consisted of 6 repetitions of 3-minute running intervals interspersed with 2 minutes of passive recovery. Repetitions 1 and 2 were performed at 75% V_{IFT} , repetitions 3 and 4 at 80% V_{IFT} , and repetitions 5 and 6 at 85% V_{IFT} . The session was ended with a 10-minute walk.

Data Processing. Each time point within a specific period was averaged as described above to perform the concurrent validity analysis for each method (CGM and finger prick) and per specific period (Figure 1). Each standardized day was analyzed first without (overall) and then as a function of breakfast type (CHO and PROT).

Statistical Analysis

Bland–Altman method for repeated measures and standardized mean bias were first applied to assess the agreement between CGM and finger-prick measures at each specific period.¹¹ The following thresholds were applied to rate the magnitude of the bias as follow: >0.2 (small), >0.6 (moderate), >1.2 (large), and >2 (very large).¹²

In addition, analysis of the median average relative difference (MARD)¹³ and the Clarke error grid analysis (EGA)¹⁴ were conducted. Regarding MARD, further comparisons between the different periods were performed using Wilcoxon test and/or Kruskal–Wallis tests. Level of statistical significance was set at $P < .05$. Results were further analyzed while calculating standardized differences, that is, Wilcoxon effect sizes. The thresholds to rate the magnitude of the effects were the same than those used for mean bias. Regarding EGA, results were divided into 5 zones

(A, B, C, D, and E). Each zone denotes a degree of clinical implications of blood glucose concentration measures. Zones A and B were considered clinically acceptable, while zones C, D, and E (erroneous treatment) were deemed possibly unsafe.¹⁴

Results

The Bland–Altman analysis for the 4 periods is presented in Figure 2 and reported as mean bias (SE). Irrespectively of the breakfast content, mean biases were trivial to small for postbreakfast (−2.99 [17.75] mg/dL), preexercise (−1.67 [10.95] mg/dL), postexercise (4.18 [17.88] mg/dL), and moderate during exercise (12.25 [13.86] mg/dL). Regarding CHO breakfast, mean biases were trivial to small for postbreakfast (−1.43 [25.98] mg/dL), preexercise (−4.29 [11.66] mg/dL), postexercise (3.32 [18.18] mg/dL), and moderate during exercise (14.06 [13.81] mg/dL). For PROT breakfast, trivial mean bias was observed for preexercise (0.91 [8.98] mg/dL), postbreakfast (−4.51 [8.31] mg/dL), and postexercise (5.13 [15.98] mg/dL), while moderate mean biases were observed for exercise (10.47 [13.19] mg/dL).

The results of the MARD analysis between the different periods are presented in Tables 1 and 2.

Results regarding EGA are presented in Table 3. Irrespectively of the breakfast content, postbreakfast, preexercise, and postexercise periods fell into zones A (accurate) and B (benign errors) (100%). However, during exercise, 94% of the values fell into A (70.4%) and B (23.6%), and 6% in zone D (failure to treat errors). For CHO breakfast, 10.5% of data fell into zone D for exercise, while the other periods fell into zones A and B. Similarly, for PROT breakfast, 1.6% fell into zone D during the exercise period.

Discussion

The aim of this study was (1) to investigate the concurrent validity of a new CGM device in recreational athletes at postbreakfast, preexercise, exercise, and postexercise and (2) to assess the potential impact of either a CHO-rich or PROT-rich breakfast on the observed level of validity. The main results highlighted that, while the validity of CGM was acceptable at rest (ie, postbreakfast, preexercise, and postexercise), it was lower during exercise and especially after the CHO breakfast.

The first results demonstrated trivial to small mean bias during all the nonexercise periods, irrespectively of nutritional intake. Moreover, all results from EGA fell into the “clinically safe zone”

Table 1 Median Absolute Relative Difference Between the Continuous-Glucose-Monitoring Device and Finger-Prick Measures

	Postbreakfast	Preexercise	Exercise	Postexercise
Overall	9.1 (4.6–13.8)	7.1 (3.6–13.4) [#]	13.6 (6.8–23.2) [*]	9.4 (5.0–17.3) ^{#,†}
Carbohydrates	9.4 (5.3–16.8)	7.1 (3.9–13.2) [*]	16.2 (7.4–25.6) ^{*,#}	10.1 (6.1–16.9) ^{#,†}
Protein	8.8 (4–11.9)	7.0 (3.4–13.4)	11.3 (6–19.7) ^{*,#}	8.2 (4.1–17.3)

Note: Values are presented as median (interquartile range) and expressed in percentage.

^{*}Significantly different from postbreakfast. [#]Significantly different from preexercise. [†]Significantly different from exercise. Comparisons between periods are presented as effect size with 90% CI.

Table 2 Comparisons Between Periods Presented as Effect Size for Wilcoxon Test With 90% CI

	Postbreakfast vs exercise	Postbreakfast vs Postexercise	Preexercise vs exercise	Preexercise vs Postexercise	Exercise vs postexercise
Overall	0.24 (0.17–0.31)	0.07 (0.01–0.16)	0.31 (0.24–0.38)	0.16 (0.07–0.24)	0.15 (0.06–0.23)
Carbohydrates	0.24 (0.13–0.34)	0.06 (0.01–0.18)	0.37 (0.27–0.46)	0.19 (0.07–0.31)	0.18 (0.07–0.28)
Protein	0.24 (0.14–0.34)	0.08 (0.01–0.2)	0.26 (0.16–0.36)	0.18 (0.01–0.24)	0.12 (0.02–0.24)

Table 3 Clark Error Grid Analysis Between the Continuous-Glucose-Monitoring Device and Finger-Prick Measures

	Zone	Postbreakfast	Preexercise	Exercise	Postexercise
Overall	A (accurate)	189 (88.3%)	213 (93.4%)	176 (70.4%)	100 (76.3%)
	B (benign errors)	25 (11.7%)	14 (6.1%)	59 (23.6%)	31 (23.7%)
	D (failure to treat errors)	/	1 (0.5%)	15 (6.0%)	/
Carbohydrates	A (accurate)	85 (80.2%)	104 (92.0%)	81 (65.3%)	52 (75.4%)
	B (benign errors)	21 (19.8%)	9 (8.0%)	30 (24.2%)	17 (24.7%)
	D (failure to treat errors)	/	/	13 (10.5%)	/
Protein	A (accurate)	104 (96.3%)	109 (94.8%)	95 (75.4%)	48 (77.4%)
	B (benign errors)	4 (3.7%)	5 (4.3%)	29 (23.0%)	14 (22.6%)
	D (failure to treat errors)	/	1 (0.9%)	2 (1.6%)	/

Note: Zone A represents a clinically accurate measure. Zone B stands for benign errors. Zone C represents overcorrection errors. Zones D and E represent failure to treat errors and erroneous treatment errors, respectively. For more details, see Clarke et al.¹⁴

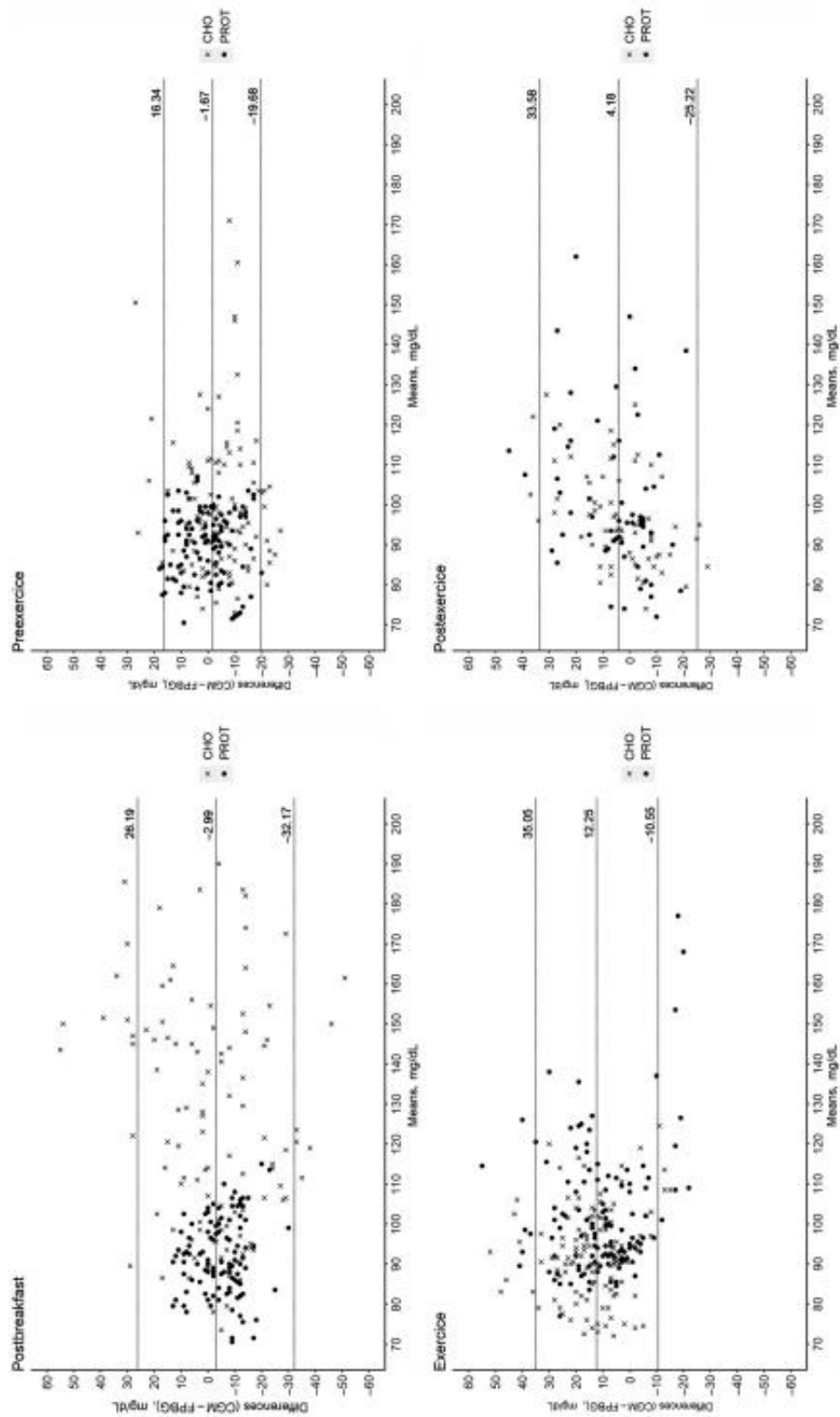


Figure 2 — Bland-Altman analysis between the CGM device and FPBG. The dashed lines represent the limits of agreements. CGM indicates continuous glucose monitoring; CHO, carbohydrates; FPBG, finger-prick blood glucose; PROT, protein.

(A and B), albeit during exercise. These results are similar to those shown previously in nonathletic diabetic populations.¹⁵ Indeed, the present results suggest that assessing glucose dynamics at rest is feasible with this CGM device. This could open the door to a better individualization of nutritional strategies.⁵

Yet, we observed a higher bias during exercise compared with the other periods, confirming previous studies in a nonathletic diabetic population.¹⁶ Reasons that may contribute to the reduced validity of the CGM device in this context include microcirculation perturbations as a result of movements around or within the

insertion area, increases in body temperature, and rapid fluxes in glucose levels during exercise.¹⁷ Regarding the likely physiological time lag of glucose transport between blood and interstitial fluid compartments (see Figure 3, finger-prick measures changed faster postbreakfast than that of the CGM device), it should be noted that it might not have accounted for the observed difference in accuracy as the pattern is not only delayed, but it varies with time and conditions. Indeed, while a clear hypoglycemia was observed with finger-prick measures immediately at the start of exercise (which was the expected physiological response), the CGM showed an increased

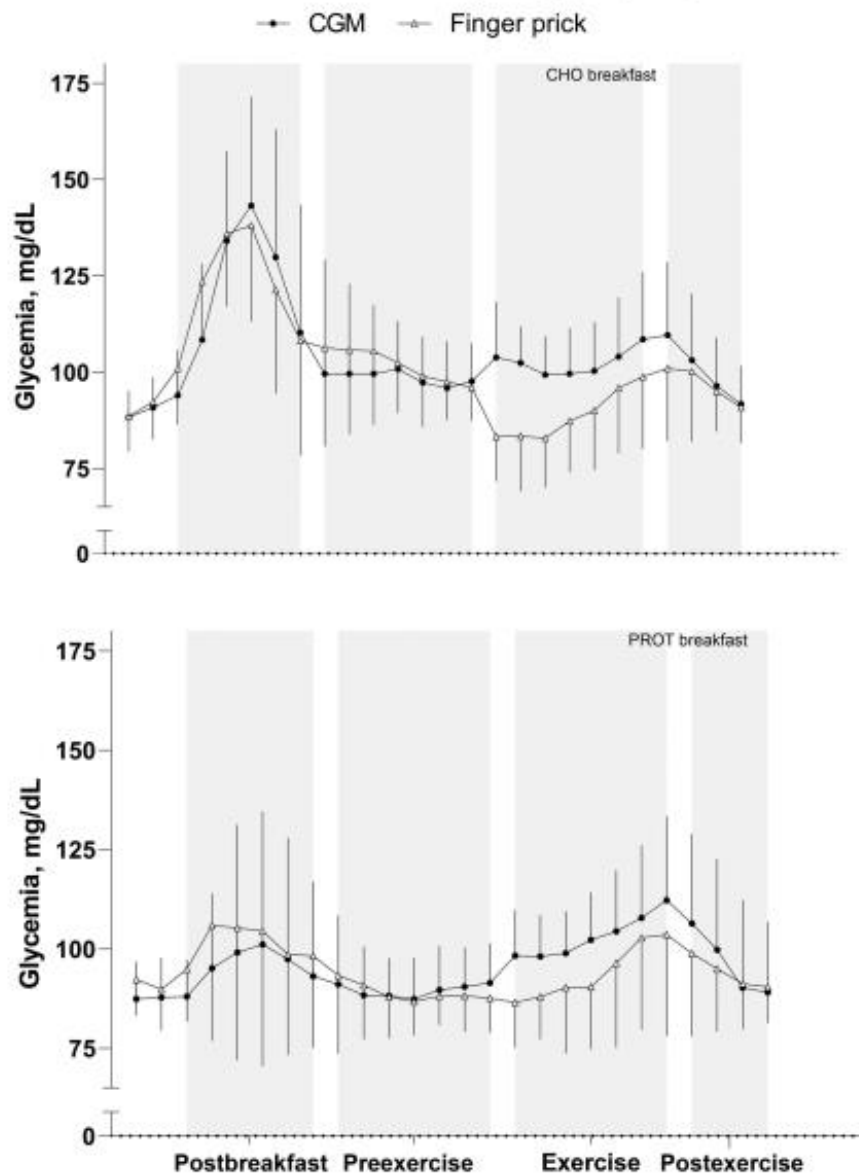


Figure 3 — CGM and finger-prick measures during each standardized condition when ingesting a CHO- (upper) and PROT- (lower) oriented breakfast, with the 2 days of each breakfast condition pooled for each participant ($n = 2 \times 8$ for each curve). Values are presented as mean (SE). CGM indicates continuous glucose monitoring; CHO, carbohydrates; PROT, protein.

blood glucose response (Figure 2). Nonetheless, this discrepancy indicates that the CGM device was unable to detect a potential hypoglycemia observed at the onset of exercise and could, therefore, not be used to assess strategies aiming at preventing this phenomenon in practice. It is worth mentioning that a trend for a better agreement was observed toward the end of the exercise periods (Figure 2). If the duration of the exercise also affects the accuracy of CGM, it means that while the device may not be suitable for sport including short and intermittent exercise durations, its use could perhaps be considered during longer event, such as cycling, trail, or triathlon. This potential better accuracy toward longer exercise duration highlights the need to conduct further research involving (1) longer exercise duration, (2) nutritional intake during long endurance race, (3) various exercise modalities, and (4) different intensities.

To examine the potential effect of the absolute levels of glycemia on the validity of the CGM device, different breakfasts were proposed (CHO and PRO). Similar MARD and EGA results were observed, suggesting that the CGM validity was not affected by the breakfast content during nonexercise periods (ie, postbreakfast, preexercise, postexercise). Specific precompetition nutritional strategies can have a positive influence on both the acute running performance among rugby league players¹⁸ or endurance athletes,¹⁹ and the chronic training adaptations to training.²⁰ Consequently, the use of this CGM device could be considered by practitioners willing to monitor glycemic responses before and after competition or training, to ensure the efficacy of the nutritional strategies employed.

However, during the exercise period, the CGM accuracy was modulated by breakfast content. Indeed, a 10 times higher value in zone D of the EGA (ie, clinically unsafe) was observed post CHO (10.5%) compared with post PROT (1.6%) breakfast. In our study, zone D corresponds to the situation where finger-prick measures indicate a hypoglycemic state; whereas, CGM measures are within the normal range,¹⁴ suggesting that CGM failed to detect the hypoglycemia occurring during exercise after the CHO-rich breakfast. It is well known that there is a rapid drop of blood glucose concentration at the onset of exercise, due to an increased glucose uptake by exercising muscles.²¹ This physiological mechanism could explain why the sensor lacks sensitivity to rapid changes in glucose concentration, as observed in the present study. As it stands, if practitioners want to monitor blood glucose during high-intensity intermittent exercise, they need to consider other devices than CGM (eg, finger prick).

Practical Applications

1. The present CGM system provided valid measures at rest. Therefore, the use of such a system may allow for a better individualization of nutritional strategies before or after competition.
2. The level of validity was lower during high-intensity intermittent training and was in addition influenced by the type of breakfast consumed (ie, high CHO or high PROT). Consequently, practitioners should avoid using this device during intermittent exercise.

Conclusion

Daily monitoring of blood glucose is of importance in athletes given the likely impact of glycemia on performance and the

individualized nutritional recommendations that can be made with CGM. Our results highlighted that the CGM device examined in the present study presented only trivial to small bias when compared with a traditional finger-prick device at rest, suggesting that it could be used confidently during this specific period. The CGM device is not valid enough to monitor glucose during intermittent exercise. Further analyses should however evaluate the validity of this device over longer exercise duration.

References

1. Cavalot F, Pagliarino A, Valle M, et al. Postprandial blood glucose predicts cardiovascular events and all-cause mortality in type 2 diabetes in a 14-year follow-up: lessons from the San Luigi Gonzaga diabetes study. *Diabetes Care*. 2011;34(10):2237–2243. PubMed ID: 21949221 doi:10.2337/dc10-2414
2. Gallwitz B. Implications of postprandial glucose and weight control in people with type 2 diabetes: understanding and implementing the International Diabetes Federation guidelines. *Diabetes Care*. 2009;32(suppl 2):S322–S325. doi:10.2337/dc09-s331
3. Harper LD, Briggs MA, McNamee G, et al. Physiological and performance effects of carbohydrate gels consumed prior to the extra-time period of prolonged simulated soccer match-play. *J Sci Med Sport*. 2016;19(6):509–514. PubMed ID: 26115589 doi:10.1016/j.jsams.2015.06.009
4. Kingsley M, Penas-Ruiz C, Terry C, Russell M. Effects of carbohydrate-hydration strategies on glucose metabolism, sprint performance and hydration during a soccer match simulation in recreational players. *J Sci Med Sport*. 2014;17(2):239–243. PubMed ID: 23702257 doi:10.1016/j.jsams.2013.04.010
5. Hall H, Perelman D, Breschi A, et al. Glucotypes reveal new patterns of glucose dysregulation. *PLoS Biol*. 2018;16(7):1–23. doi:10.1371/journal.pbio.2005143
6. Thomas F, Pretty CG, Desai T, Chase JG. Blood glucose levels of subelite athletes during 6 days of free living. *J Diabetes Sci Technol*. 2016;10(6):1335–1343. PubMed ID: 27301981 doi:10.1177/1932296816648344
7. Greene J, Louis J, Korostynska O, Mason A. State-of-the-art methods for skeletal muscle glycogen analysis in athletes-the need for novel non-invasive techniques. *Biosensors*. 2017;7(1):1–16. doi:10.3390/bios7010011
8. Gómez AM, Umpierrez GE, Muñoz OM, et al. Continuous glucose monitoring versus capillary point-of-care testing for inpatient glycemic control in type 2 diabetes patients hospitalized in the general ward and treated with a basal bolus insulin regimen. *J Diabetes Sci Technol*. 2016;10(2):325–329. doi:10.1177/1932296815602905
9. Rodrigo EP, Deib-Morgan K, de Diego OG, García-Velasco P, Sgarbetta GA, González IG. Accuracy and reliability between glucose meters: a study under normal clinical practice conditions. *Semer - Med Fam*. 2017;43(1):20–27.
10. Buchheit M. The 30-15 Intermittent fitness test: accuracy for individualizing interval training of young intermittent sport players. *J Strength Cond Res*. 2008;22(2):365–374. PubMed ID: 18550949
11. Altman D, Bland J. Diagnostic tests. 1: sensitivity and specificity. *BMJ*. 1994;308:1552. PubMed ID: 8019315
12. Hopkins WG. Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Med*. 2000;30(1):1–15. PubMed ID: 10907753
13. Reiterer F, Polterauer P, Schoemaker M, et al. Significance and reliability of MARD for the accuracy of CGM systems. *J Diabetes Sci Technol*. 2017;11(1):59–67. PubMed ID: 27566735 doi:10.1177/1932296816662047

14. Clarke WL, Cox D, Gonder-Frederick LA, Carter W, Pohl SL. Evaluating clinical accuracy of systems for self-monitoring of blood glucose. *Diabetes Care*. 1987;10(5):622–628. PubMed ID: 3677983 doi:10.2337/diacare.10.5.622
15. Freckmann G, Pleus S, Link M, Zschornack E, Klötzer HM, Haug C. Performance evaluation of three continuous glucose monitoring systems: comparison of six sensors per subject in parallel. *J Diabetes Sci Technol*. 2013;7(4):842–853. PubMed ID: 23911165 doi:10.1177/193229681300700406
16. Biagi L, Bertachi A, Quirós C, et al. Accuracy of continuous glucose monitoring before, during, and after aerobic and anaerobic exercise in patients with type 1 diabetes mellitus. *Biosensors*. 2018;8(1):1–8. doi:10.3390/bios8010022
17. Kumareswaran K, Elleri D, Allen JM, et al. Accuracy of continuous glucose monitoring during exercise in type 1 diabetes pregnancy. *Diabetes Technol Ther*. 2013;15(3):223–229. PubMed ID: 23445170 doi:10.1089/dia.2012.0292
18. Bradley WJ, Morehen JC, Haigh J, et al. Muscle glycogen utilisation during rugby match play: effects of pre-game carbohydrate. *J Sci Med Sport*. 2016;19(12):1033–1038. PubMed ID: 27134132 doi:10.1016/j.jsams.2016.03.008
19. Rothschild JA, Kilding AE, Plews DJ. What should I eat before exercise? Pre-exercise nutrition and the response to endurance exercise: current prospective and future directions. *Nutrients*. 2020;12(11):1–23. doi:10.3390/nu12113473
20. Jeukendrup AE. Periodized nutrition for athletes. *Sports Med*. 2017;47(s1):51–63. doi:10.1007/s40279-017-0694-2
21. Richter EA, Hargreaves M. Exercise, GLUT4, and skeletal muscle glucose uptake. *Physiol Rev*. 2013;93(3):993–1017. PubMed ID: 23899560 doi:10.1152/physrev.00038.2012

Annexe 2 - Validité et reproductibilité du GPS pour l'évaluation du profil force-vitesse en sprint chez les athlètes élités

Concurrent Validity and Reliability of Sprinting Force–Velocity Profile Assessed With GPS Devices in Elite Athletes

Pauline Clavel,^{1,2} Cedric Leduc,^{3,4} Jean-Benoît Morin,⁵ Cameron Owen,^{3,6} Pierre Samozino,⁷
Alexis Peeters,⁸ Martin Buchheit,^{2,9,10,11} and Mathieu Lacombe^{2,12}

¹Performance Department, Paris Saint-Germain FC, Saint-Germain-en-Laye, France; ²French Institute of Sport (INSEP), Laboratory of Sport, Expertise and Performance (EA 7370), Paris, France; ³Carnegie Applied Rugby Research Centre, Institute for Sport, Physical Activity and Leisure, Carnegie School of Sport, Leeds Beckett University, Leeds, United Kingdom; ⁴Sport Science and Medicine Department, Crystal Palace Football Club, Beckenham, United Kingdom; ⁵Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité, EA 7424, Université Lyon, UJM-Saint-Etienne, Saint-Etienne, France; ⁶Leeds Rhinos Netball Club, Leeds, United Kingdom; ⁷Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité, EA 7424, Université Savoie Mont Blanc, Chambéry, France; ⁸Research Department, French Rugby Federation, Marcoussis, France; ⁹HiIT Science, Revelstoke, BC, Canada; ¹⁰Institute for Health and Sport, Victoria University, Melbourne, VIC, Australia; ¹¹Kitman Labs, Performance Research Intelligence Initiative, Dublin, Ireland; ¹²Performance and Analytics Department, Parma Calcio 1913, Parma, Italy

Purpose: The aims of this study were to (1) assess the concurrent validity of global positioning systems (GPSs) against a radar device to measure sprinting force–velocity (F – v) profiles and (2) evaluate the interunit reliability of 10-Hz GPS devices (Vector S7, Catapult Innovations). **Methods:** Sixteen male elite U18 rugby union players (178.3 [7.6] cm; 78.3 [13.2] kg) participated. Two 50-m sprints interspersed with at least 5 minutes of recovery were completed to obtain input (maximal sprint speed and acceleration time constant τ) and output (theoretical maximal horizontal force, sprinting speed, and horizontal power) F – v profile variables. Sprint running speed was concurrently measured with a radar and 2 GPS units placed on the upper back of each player. Concurrent validity and interunit reliability analyses were performed. **Results:** Moderate to nearly perfect correlations were observed between radar and GPS-derived F – v variables, with small to large typical errors. Trivial to small coefficients of variation were found regarding the GPS interunit reliability. **Conclusion:** The GPS devices tested in this study represent a valid and reliable alternative to a radar device when assessing sprint acceleration F – v profiles in team-sport players.

Keywords: team sport, power, running, sport performance, speed

To assess the sprint force–velocity (F – v) profile, practitioners need to set standardized protocols and record special temporal or running speed–time data using specific devices such as radar.¹ While radar is considered as a reference measure to assess speed,¹ not all high-level clubs have access to such technology. Moreover, in elite sport environments, time is scarce, and it may be difficult for practitioners to dedicate a full testing session to assess F – v profiles.² However, most elite teams are now equipped with global positioning system (GPS) devices,³ which could represent a viable alternative to measure players' position–speed–time data and compute F – v profiles without additional equipment and associated time demand.

Recent investigations have already highlighted the possibility to use the raw 10 Hz data (ie, from GPS) to extrapolate sprint mechanical properties by analyzing the validity against radar and laser devices⁴ or timing gates.⁵ They observed mixed results likely due to the limited accuracy of the GPS units used. Moreover, Lacombe et al⁶ examined the interunit reliability and observed trivial to small typical error and good to very good between-device intraclass correlation coefficients. This suggests that practitioners could reliably examine F – v profile with GPS. While considerations have only been made on the output variables (ie, F – v profile variables), the validity and reliability of the model's input variables (speed–time curve characteristics) remains unknown. Finally, it is yet to be determined if the integration of double constellation system (including GNSS [Global Navigation Satellite System] and GPS) improves the accuracy of GPS devices to produce F – v profile variables.

Therefore, the first aim of this study was to assess the concurrent validity of input variables (maximal sprint speed and acceleration constant τ). Secondly similar analyses were conducted on the output variables (theoretical maximal horizontal force [F_0], sprinting speed [V_0], and horizontal power [P_{max}]) obtained with GPS. Finally, the interunit reliability of F – v profile variables assessed using GPS data were investigated.

Methods

Subjects

Sixteen male elite U18 rugby union players (height 178.3 [7.6] cm; body mass 78.3 [13.2] kg) were included as part of a training camp for the French national squad. Participants provided informed consent prior to starting the study. Ethics approval was granted by the Leeds Beckett University ethics board and complied with the recommendations of the Declaration of Helsinki.

Design

The F – v profile was assessed at the beginning of a rugby training session on a natural open-field grass pitch. A 20-minutes warm-up was performed including running drills and 2 progressive 30-m sprints. Following the warm-up, 2 sprints of 50 m with at least 5-minute recovery between each trial were performed. No specific signal to initiate the sprint was given to athletes. However, they were instructed to stand still in order to avoid any backward movement prior to starting their sprint, and to accelerate maximally once they commenced. Each sprint was concurrently measured

Clavel (pclavel@psg.fr) is corresponding author.

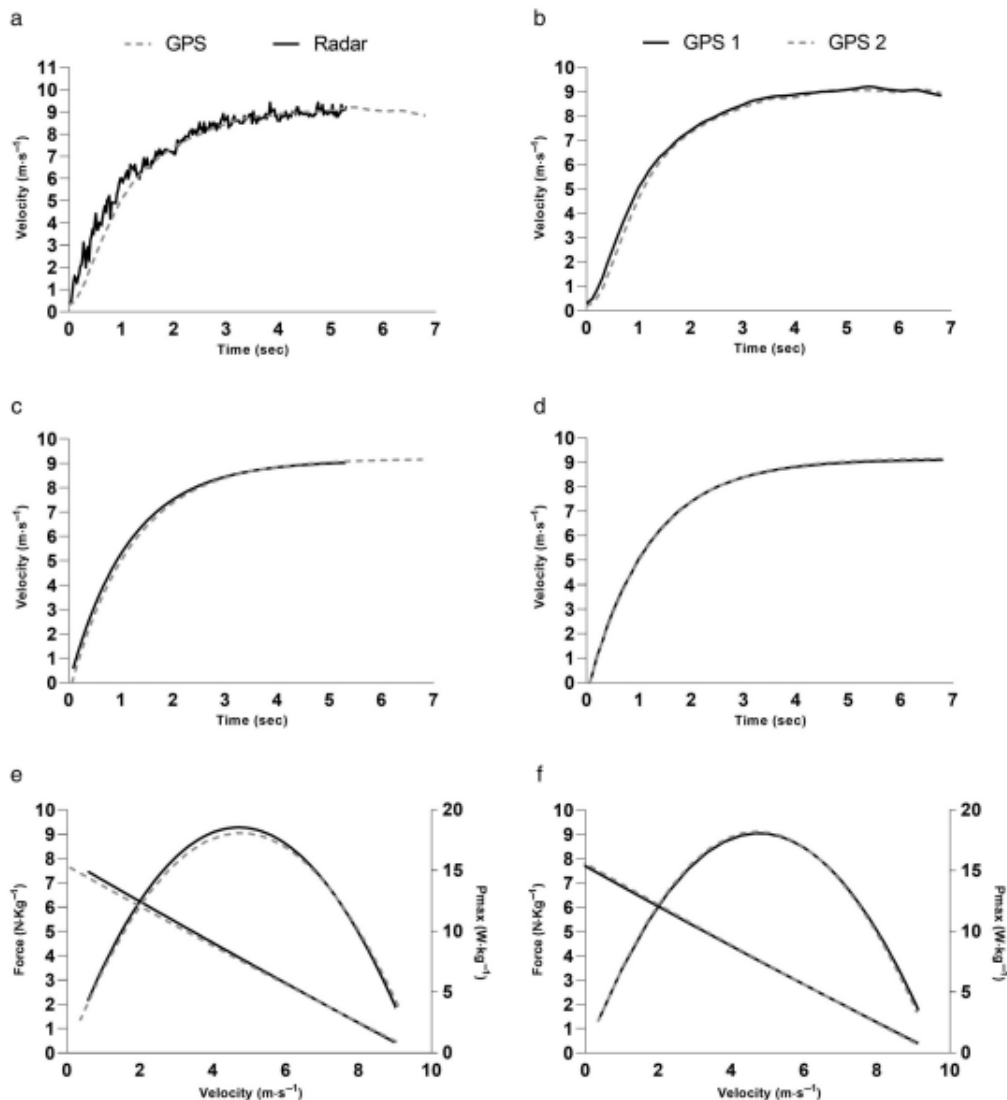


Figure 1 — Schematic representation of the automatic data processing. The left panel represents the validity analysis where GPS was compared with radar. The right panel represents the interunit reliability analysis. Both share the same data processing via the script. (a and b) The identification of the beginning and end of the sprint from the raw speed signal. The script identifies the beginning (ie, first speed value $> 0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ from 0) and the end of the sprint (ie, negative acceleration after player reached maximal speed). The middle panel (c and d) shows raw speed data fitting into a monoexponential equation using a least-square regression method from the nonlinear-least-squares optimization function of the *nlstools* package (version 3.6.2). A d was integrated into the initial equation to improve the goodness of fit if the actual start of the sprint did not occur at $t = 0 \text{ s}$ ($0.09 [0.04] \text{ s}$ on average in the present study). The lower panel (e and f) aimed to calculate the speed-time data, F_0 (in newtons per kilogram), P_{max} (in watts per kilogram), and V_0 (in meters per second). All data analysis was performed with R statistical software (R version 4.0.2. R Foundation for Statistical Computing). F_0 indicates theoretical maximal horizontal force; MSS , maximal sprint speed; P_{max} , maximal horizontal sprinting power; V_0 , theoretical maximal sprinting speed; τ , the acceleration time constant; d , time delay.

using a radar and 2 GPS devices. The radar (Stalker Pro II Sports Radar Gun) sampling at 46.875 Hz, was placed on a tripod 5 m behind the player and 1 m above the ground. The GPS units (Vector S7) sampled at 10 Hz and encompassed a double constellation system (ie, GNSS and GPS). The 2 GPS units were carried in a tightly fit vest allowing the 2 units to be positioned side by side 5 cm apart around C7-T1. The average horizontal dilution of precision was 0.74 (0.10), and number of satellites was 15.5 (1.5), which are considered to be within range of good signal quality.⁷

Raw speed signal gathered via radar (firmware version 2.0.7) and GPS (firmware version 8.1.0) devices were downloaded from their respective manufacturer software and uploaded into a custom-made script to calculate F-v profiles automatically with R statistical software (R version 4.0.2, R Foundation for Statistical Computing) based on the computation method presented and validated in previous studies.^{8,9} The whole data processing and analysis script is further explained in Figure 1 and Supplementary Material [available online].

Statistical Analyses

All data were first log transformed to reduce bias arising from nonuniformity error. However, values presented in the text and figures are the back-transformed data. The concurrent validity was assessed with Bland-Altman method mean bias (90% CI), the typical error of the estimate (90% CI) both in percentage and standardized units, and Pearson correlation coefficients. The magnitude of the standardized mean bias, typical error of the estimate, and correlations were interpreted as proposed by Hopkins.¹⁰

The interunit reliability of F-v profile measured with GPS was assessed with the typical error of measurement expressed as a coefficient of variation (CV, 90% CI) as well as in standardized units and intraclass correlation. Moreover, the smallest worthwhile change (SWC; $0.2 \times$ between-athletes SD) was calculated. The sensitivity (signal to noise ratio) was classified as follows: good (CV < SWC), OK (CV = SWC), or poor (CV > SWC).¹⁰

Results

Data related to the concurrent validity analysis and interunit reliability are displayed in Table 1. Limits of agreements from the Bland-Altman analysis are reported in Figure 2. Pearson correlation revealed a moderate relationship for F0 ($r = .48$ [.29 to .62]), large for τ (.56 [.40 to .69]), very large for P_{max} (.74 [.62 to .82]), and nearly perfect for maximal sprint speed (.96 [.94 to .97]) as well as V0 (.94 [.91 to .96]).

Discussion

The main findings of this study showed that GPS could be considered as a valid and reliable device to assess F-v profile variables. These results are promising and could open-up new possibilities in terms of players physical testing.

The present results showed moderate to nearly perfect correlation and small to moderate error between GPS and radar devices regarding F-v profile-related variables (F0, V0, and P_{max}), which was similar to Nagahara et al.⁴ However, only a 10 Hz device including a double constellation system has been used in our study compared with Nagahara et al.⁴ who used 20 Hz GPS units (from a different brand) and a single constellation. A previous study showed significant improvements both in positioning accuracy and integrity monitoring as a result of the use of double constellation system.¹¹ Moreover, our study was performed in an open field (ie, without surrounding metallic structure), which suggests that current GPS technology when combined with optimal environmental conditions is accurate enough to monitor F-v profiles.

However, poorer concurrent validity (large to very large correlation and moderate typical errors) was observed for P_{max} and F0 compared with V0 (nearly perfect correlation and small typical error). The origin of this difference is unclear and could be attributed to the ~5 times lower sample frequency of the GPS compared with the radar or the instantaneous signal precision. In other research, Nagahara et al.⁴ showed that the accuracy of GPS to measure F-v

Table 1 Concurrent Validity and Interunit Reliability Analysis

	MSS, m·s ⁻¹	τ , s	P_{max} , W·kg ⁻¹	V0, m·s ⁻¹	F0, N·kg ⁻¹
Validity					
Criterion (radar)	8.84 (1.06)	1.24 (1.14)	16.7 (1.12)	9.26 (1.06)	6.98 (1.11)
Practical (GPS)	8.81 (1.05)	1.25 (1.08)	16.08 (1.10)	9.23 (1.06)	6.96 (1.07)
Mean bias, %	-0.28 (-0.63 to 0.07)	.51 (-1.85 to 2.93)	-0.56 (-2.25 to 1.17)	-0.27 (-0.73 to 0.20)	-0.19 (-2.33 to 1.99)
Standardized mean bias	-0.05 (-0.11 to 0.01)	.04 (-.15 to .23)	-0.05 (-0.20 to 0.10)	-0.04 (-0.12 to 0.03)	-0.02 (-0.22 to 0.18)
TEE as CV, %	1.7 (1.4 to 2.0)	11.30 (9.77 to 13.45)	7.99 (6.92 to 9.48)	2.16 (1.88 to 2.55)	10.12 (8.76 to 12.04)
Standardized TEE	0.29 (0.24 to 0.37)	1.48 (1.05 to 2.32)	0.92 (0.70 to 1.26)	0.36 (0.29 to 0.46)	1.85 (1.25 to 3.25)
Reliability					
GPS 1	8.81 (1.06)	1.25 (1.08)	16.02 (1.10)	9.24 (1.06)	6.93 (1.07)
GPS 2	8.81 (1.05)	1.25 (1.07)	16.14 (1.11)	9.23 (1.05)	6.99 (1.07)
TE as CV, %	0.5 (0.4 to 0.7)	2.0 (1.7 to 2.6)	1.4 (1.2 to 1.8)	0.6 (0.5 to 0.8)	1.8 (1.5 to 2.4)
Standardized TE	0.10 (0.08 to 0.12)	.28 (.23 to .36)	0.15 (0.12 to 0.18)	0.12 (0.10 to 0.15)	0.28 (0.23 to 0.35)
ICC (90% CI)	.99 (.98 to 1.00)	.93 (.88 to .96)	.98 (.96 to .99)	.99 (.98 to 1.00)	.93 (.88 to .96)
SWC, %	1.0	1.5	2.0	1.1	1.4
Sensitivity	Good	Poor	Good	Good	Poor

Abbreviations: CV, coefficient of variation; τ , time delay; F0, theoretical maximal horizontal force; GPS, global positioning system; ICC, intraclass correlation coefficient; MSS, maximal sprint speed; P_{max} , maximal horizontal sprinting power; SWC, smallest worthwhile change; TE, typical error; TEE, typical error of estimate; V0, theoretical maximal sprinting speed; τ , acceleration time constant. Note: Raw data for criterion (radar) and practical (GPS) devices are presented as mean (SD). Other concurrent validity statistics are presented with 90% CIs. Raw data for GPS 1 and 2 are presented as mean (SD). Reliability statistics are presented with 90% CIs.

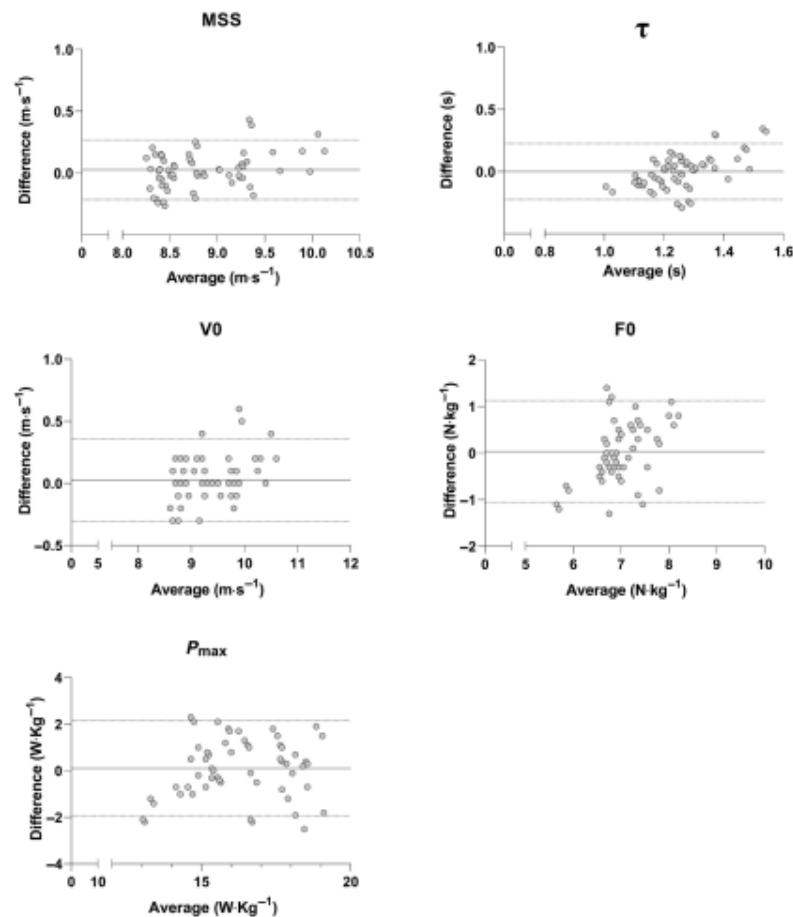


Figure 2 — Bland–Altman analyses. Black line represents the bias. Dashed lines represent 90% limits of agreements.

profiles was lowered when 5 Hz GPS was used compared with 20 Hz. Hence, with the inclusion of a double constellation system, the bias observed was similar despite lower sample frequency. Therefore, the integration of GPS systems with higher sampling rate is likely required to improve the validity of F–v profile measured with GPS devices. Moreover, while V0 is calculated based on maximal sprint speed (corresponding to a steady state), F0 is mainly related to τ , which is associated to a rate of state change. Consequently, F0 could be more affected by the measurement system and/or data processing, explaining the higher typical error compared with V0.¹² As such, the validity of FVP (and especially F0) using GPS seems dependent of the device sampling rate and the system precision. Nevertheless, the use of GPS devices to assess F–v profiles are now appropriate and could be considered by practitioners in their daily practice since double constellation system are common.

The results of the present study highlighted that the interunit GPS reliability was very high when analyzing F–v profile-related

data. Similar results were observed by Lacombe et al⁶ who reported small typical errors, supporting that GPS is a reliable method to monitor F–v profiles. While lower sensitivity was observed for F0, this could be improved using more testing repetitions (as the error decreases by a factor of $\sqrt{n}$ repetitions¹³), which would be more feasible by using GPS devices in practice (eg, 4–6 sprints within warm-up). As only the interunit reliability has been measured in the present study, further research is necessary to understand the intraunit reliability, the week to week variability, and the sensitivity to changes (eg, pre–post preseason) of the F–v profile obtained with GPS.

Practical Applications

- F–v profile variables assessed through Catapult Vector S7 GPS devices (sampled at 10 Hz and including a double constellation system) presented small-to-moderate error compared with a

radar device. Practitioners could consider these GPS devices as an alternative for more frequent assessment.

- F-v profile variables obtained with GPS showed a high interunit reliability, confirming findings from previous studies that GPS units can be used interchangeably to measure F-v profiles in team sports athletes.

Conclusion

The present study indicates that the Catapult Vector S7 GPS device is a valid, reliable, and time-effective alternative to radar when assessing sprint acceleration F-v profiles in team sport players. Future studies need to compare F-v profile-related kinetic variables with the gold standard (ie, tracks equipped with force plates), or consider other reference systems with a higher sample frequency than radar devices (ie, laser, robotic sprint resistance device).

References

1. Haugen TA, Breitschädel F, Samozino P. Power-force-velocity profiling of sprinting athletes: methodological and practical considerations when using timing gates. *J Strength Cond Res*. 2020;34(6):1769–1773. PubMed ID: 30273283 doi:10.1519/JSC.00000000000002890
2. Lacomme M, Peeters A, Mathieu B, Marrier B, Carling C, Piscione J. Can we use GPS for assessing sprinting performance in rugby sevens? a concurrent validity and between-device reliability study. *Biol Sport*. 2019;36(1):25–29. PubMed ID: 30899136 doi:10.5114/biolSport.2018.78903
3. Akenhead R, Nassis GP. Training load and player monitoring in high-level football: current practice and perceptions. *Int J Sports Physiol Perform*. 2016;11(5):587–593. PubMed ID: 26456711 doi:10.1123/ijspp.2015-0331
4. Nagahara R, Botter A, Reje E, et al. Concurrent validity of GPS for deriving mechanical properties of sprint acceleration. *Int J Sports Physiol Perform*. 2017;12(1). doi:10.1123/ijspp.2015-0566
5. Hoppe MW, Baumgart C, Polglaze T, Freiwald J. Validity and reliability of GPS and LPS for measuring distances covered and sprint mechanical properties in team sports. *PLoS One*. 2018;13(2):1–21. PubMed ID: 29420620 doi:10.1371/journal.pone.0192708
6. Lacomme M, Owen C, Peeters A, Piscione J, Lemeur Y, Leduc C. Force velocity profiling with GPS: is it reliable? *Sport Perform Sci Rep*. 2020;1:5–7.
7. Malone JJ, Lovell R, Varley MC, Coutts AJ. Unpacking the black box: applications and considerations for using GPS devices in sport. *Int J Sports Physiol Perform*. 2017;12(suppl 2):18–26. PubMed ID: 27736244 doi:10.1123/ijspp.2016-0236
8. Samozino P, Rabita G, Dorel S, et al. A simple method for measuring power, force, velocity properties. *Scand J Med Sci Sports*. 2016;648–658. PubMed ID: 25996964 doi:10.1111/sms.12490
9. Morin JB, Samozino P, Murata M, Cross MR, Nagahara R. A simple method for computing sprint acceleration kinetics from running velocity data: replication study with improved design. *J Biomech*. 2019;94:82–87. PubMed ID: 31376978 doi:10.1016/j.jbiomech.2019.07.020
10. Hopkins WG. How to interpret changes in an athletic performance test. *Sportscience*. 2004;8:1–7.
11. Feng S, Jokinen A, Milner C, Ochieng W. New methods for dual constellation single receiver positioning and integrity monitoring. *Geo-Spat Inf Sci*. 2013;16(3):201–209. doi:10.1080/10095020.2013.834112
12. Varley MC, Fairweather IH, Aughey RJ. Validity and reliability of GPS for measuring instantaneous velocity during acceleration, deceleration, and constant motion. *J Sports Sci*. 2011;30(2):121–127. PubMed ID: 22122431 doi:10.1080/02640414.2011.627941
13. Taylor KL, Cronin J, Gill ND, Chapman DW, Sheppard J. Sources of variability in iso-inertial jump assessments. *Int J Sports Physiol Perform*. 2010;5(4):546–558. PubMed ID: 21266738 doi:10.1123/ijspp.5.4.546

Annexe 3. Reproductibilité du profil accélération-vitesse *in-situ* chez les jeunes footballeurs élites



Reliability of individual acceleration-speed profile *in-situ* in elite youth soccer players

P. Clavel^{a,b,1,*}, C. Leduc^{c,d}, J.-B. Morin^e, M. Buchheit^{b,f,g,h,i}, M. Lacomme^{b,j}

^a Performance Department, Paris Saint-Germain FC, Saint-Germain-en-Laye, France

^b French Institute of Sport (INSEP), Laboratory Sport, Expertise and Performance (EA 7370), Paris, France

^c Carnegie Applied Rugby Research (CARR) Center, Institute for Sport, Physical Activity and Leisure, Carnegie School of Sport, Leeds Beckett University, Leeds, United Kingdom

^d Sport Science and Medicine Department, Crystal Palace FC, London United Kingdom

^e Université Jean Monnet Saint-Etienne, Lyon 1, Université Savoie Mont-Blanc, Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité, F-42023 Saint-Etienne, France

^f HITS Science, Revelstoke, BC, Canada

^g Institute for Health and Sport, Victoria University, Melbourne, VIC, Australia

^h Kimm Labs, Performance Research Intelligence Initiative, Dublin, Ireland

ⁱ Lille OSC, Performance Department, Lille, France

^j Performance and Analytics Department, Parma Calcio 1913, Parma, Italy

ARTICLE INFO

Keywords:
Testing
Running
Sprint
GPS

ABSTRACT

The aims of this study were to describe differences in the acceleration-speed (A-S) profile *in-situ* and to assess the week-to-week reliability of the A-S profile *in-situ* over a given training cycle of elite youth soccer players, in relation to the number of sessions included and analyse the effect of the inclusion or not of a specific sprint session. In this retrospective study, 18 male elite U19 football players (179.4 ± 7.1 cm; 69.0 ± 9.5 kg) participated. GPS data collected from three consecutive typical training weeks were used to calculate different combinations of A-S profile *in-situ* variables (theoretical maximal acceleration [A_0], theoretical maximal speed [S_0] and the slope of the acceleration-speed [AS_{slope}]). The number (and content) of sessions affected mainly S_0 while A_0 remained similar with or without a sprint session. The reliability of the A-S profile *in-situ* is more related to the spread of points rather than a specific number of sessions (and thus points) and was improved when a high percentage of maximum speed (i.e. $\geq 95\%$) was reached. The present study showed low week-to-week variability for A_0 , S_0 and AS_{slope} . However, practitioners need to make sure that the values cover a sufficient range of raw data [20–95% of maximum speed] to build a clear and consistent linear regression, and in turn extrapolate meaningful A-S profile values.

1. Introduction

Sprinting and accelerating are major physical determinants of performance in team sports (Haugen et al., 2014). Monitoring soccer players' individual sprint acceleration capabilities may thus help practitioners adapt training contents at the individual player level and evaluate the effect of different training programs non-invasively (Hader et al., 2019).

Linear sprint acceleration force-velocity (F-V) profile is the current practice to monitor those mechanical variables (Morin & Samozino, 2016; Samozino et al., 2016). It provides more comprehensive and

meaningful information about mechanical properties and more precisely to determine the maximal capacities of the players to produce force (F_0), velocity (V_0), and power (P_{max}). Nowadays, GPS devices represent a valid and reliable alternative to measure players' position-speed-time data and compute F-V profiles without additional equipment and associated time demand (Lacomme et al., 2020; Clavel et al., 2022).

Recent research from Morin et al. (2021) proposed that only data gathered from daily practices without requiring any additional training could be sufficient to extrapolate similar mechanical properties information through the concept of acceleration-speed (A-S) profile *in-situ*. The idea behind the concept is that all data collected through daily

* Corresponding author.

E-mail address: paulineclavel06@gmail.com (P. Clavel).

¹ Address: Paris Saint-Germain FC, Saint-Germain-en-Laye, France.

<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2023.111602>

Accepted 21 April 2023

Available online 26 April 2023

0021-9290/© 2023 Elsevier Ltd. All rights reserved.

practices are used to build a linear relationship between speed (X axis) and acceleration (Y axis) during a specific sport activity (e.g. training, match). This concept is similar to a single sprint F-V profile where the velocity (i.e. X axis) and force (i.e. Y axis) are used. Morin et al. (2021) studied the concept based on two periods of two weeks of cumulated training data. In this study typical values were found close to those reported in professional male soccer players (Jiménez-Reyes et al., 2018, 2022; Haugen et al., 2019, 2020) regarding S_0 (9 to 10 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) vs V_0 (9.2 to 9.3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and regarding A_0 (7.2 to 7.7 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) vs F_0 (7.1 to 9 $\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$). Recent studies (Alonso-Callejo et al., 2022; López-Sagarra et al., 2022) conducted in elite male soccer players followed the method introduced by Morin et al. (2021) and found similar results. A_0 ranges from 5.7 to 8.7 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ and S_0 ranges from 5.7 to 9.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ depending on playing position and microcycle days (Alonso-Callejo et al., 2022) and the average team season of A_0 is $6.20 \pm 0.51 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ and the average team season of S_0 is $9.18 \pm 0.58 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (López-Sagarra et al., 2022).

An important methodological prerequisite to using this concept is to ensure a good density of raw points throughout the speed and acceleration spectrum (i.e. sub-maximal acceleration around a speed threshold of 3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ up to maximal running speed points) to have a consistent linear regression (high number of points and high R^2). However, beyond those initial criteria, very little is known regarding the construction of the profile, especially the minimum number of data points, sessions and the range of values required to obtain a meaningful and reliable profile. Consequently, a better understanding of the influence of input data organisation on variability of the A-S profile would allow practitioners to make better data-informed decisions and separate noise from the real change in players' speed-acceleration capabilities. Ultimately, this would allow to consistently monitor this mechanical individual profile without any additional testing.

Therefore, the aims of this study were to describe differences in the A-S profile *in-situ* and to assess the week-to-week reliability of the A-S

profile *in-situ* over a given training cycle among elite youth soccer players in relation to the number of sessions included and analyse the effect of the inclusion or not of a specific sprint session.

2. Method

2.1. Subjects

Twenty-nine U19 male soccer players from a French professional academy initially participated in this study. Goalkeepers were excluded from the study as they participated in separate training. Finally, 18 players completed the study (age 17.8 ± 0.94 years, body mass 69.0 ± 9.5 kg, stature 179.4 ± 7.1 cm). The study was approved by the club ethics board. Participants provided informed consent prior to starting the study and they gave their informed consent according to the Declaration of Helsinki.

2.2. Design

A retrospective analysis was used, with data collected from three consecutive typical training weeks (November 2020). Athletes followed the regular training plan designed by the technical staff (Fig. 1).

Each training week was composed of 5.2 ± 0.3 soccer sessions and one full-body gym session. Soccer training sessions were a mixture of technical, physical conditioning work (box to box run, sprint) and tactical practices (small-sided games and large-sided games). Small-sided games were performed from 4 vs. 4 ($20 \times 20\text{-m}$) to 9 vs. 9 + 2 goalkeepers (Gks) ($68 \times 52\text{-m}$) and a pitch ratio per player lower than 250 m^2 whereas large-sided games were performed from 7 vs. 7 + 2 Gks ($68 \times 52\text{-m}$) to 9 vs. 9 + 2 Gks ($68 \times 68\text{-m}$) and a pitch ratio per player higher than 250 m^2 . Additionally, we considered 11 vs 11 game simulation with goalkeepers played on a $104 \times 68\text{-m}$ pitch during 2 halves of

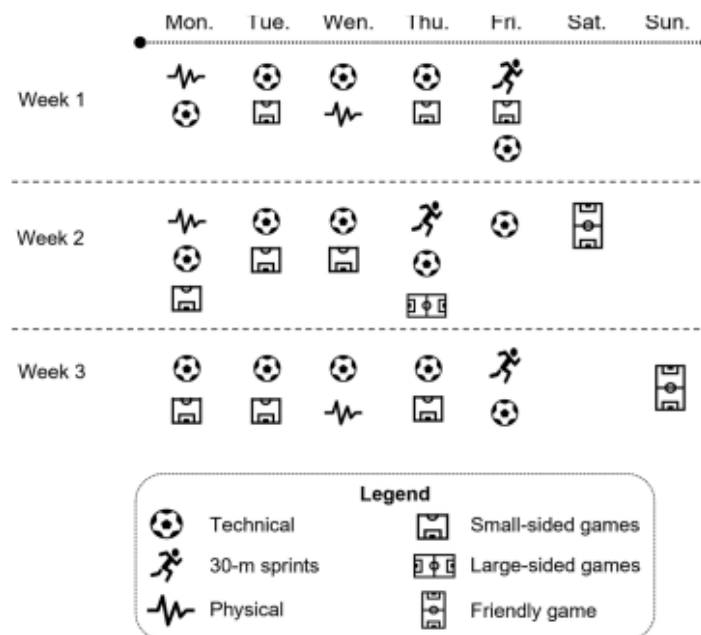


Fig. 1. Schematic representation of three weeks of regular training plan designed by the technical and performance staff. Each week was made up of 5 to 6 sessions included one specific sprint session (two 30-m sprints). Sessions were composed of technical, physical and tactical drills (e.g. small-sided games or large-sided games). GPS data were collected for each session.

40 min that has been shown to replicate match demands. No official games included in the analysis because of the COVID-19 pandemic. Once a week, all players performed two maximal 30-m sprints at the beginning of the session. Pitch sessions were performed on a natural open-field and were recorded for each athlete, utilizing a 10-Hz GPS device (APEX, STATSports, North Ireland). Each GPS unit was placed in a sports vest and worn under the playing jersey and were activated 15 min prior to warm-up to ensure a good signal quality. The horizontal dilution of precision of the signal and the number of satellites per session were 1.0 ± 0.2 and 19.7 ± 0.8 respectively which characterizes good signal quality (Malone et al., 2017).

2.3. Acceleration-speed profile *in-situ*

The methodology to calculate A-S profile has been described by Morin et al. (2021) and further illustrated in Fig. 2. All data were processed with R statistical software (R v4.0.2, R Foundation for Statistical Computing).

GPS devices generated raw speed-time data for each session (Fig. 2A). The first step was to filter the raw speed data based on a custom recursive filter. To filter the signal, a low-pass Butterworth Second Order filter with a cut-off frequency of 1 Hz and a sample frequency of 10 Hz was used. However caution should be taken since the sample frequency and the cut-off frequency are likely GPS-dependent and should be re-evaluated for other providers or models. Then the acceleration was calculated as the rate of change of the filtered speed (Fig. 2B). According to Blazevich (2017), the term "acceleration" will be used as the change in speed over a given change in time ($\Delta \text{speed} / \Delta \text{time}$) in order to simplify reading throughout the manuscript. Finally, the scatter plot shown in Fig. 2C is composed with filtered speed and positive derived acceleration data. A 3 m.s^{-1} speed threshold was chosen by Morin et al. (2021) as the center of mass velocity quickly raises 3 m.s^{-1} within the first step of a sprint acceleration, and this velocity usually corresponds to the occurrence of maximal acceleration values in this population (Morin et al., 2019; Nagahara et al., 2014). A first linear regression was fitted from the two maximal values of acceleration for each 0.2 subintervals from 3 m.s^{-1} to the individual maximal speed (Fig. 2D). Then, to improve the overall accuracy of the model, the residuals of this first regression were analyzed and all the points out of 95% of the confidence interval were removed. Finally, a second and final linear regression was fitted without these outliers (Fig. 2E) and used to delineate the individual A-S profile *in-situ*.

From this linear regression, three main variables were derived. A_0 (theoretical maximal acceleration) and S_0 (theoretical maximal speed) were the intercepts of the A-S linear relationship and respectively the y-axis and the x-axis. AS_{slope} (overall orientation of the A-S profile) were computed as $AS_{\text{slope}} = A_0 / S_0$. These variables characterize the individual player A-S profile *in-situ*.

2.4. Data processing

To evaluate the A-S profile in relation to the number of sessions included in the model (1, 2, 3, 4 or 5 sessions) and limit potential session-content effect (if selecting sessions randomly), we had to evaluate all possible combinations for every specific number of sessions. For example, there were five combinations of one session in a week with five sessions while there was one combination of five sessions in a week of five sessions (Fig. 4). For each combination, A-S profile derived variables (A_0 , S_0 and AS_{slope}) were calculated (Fig. 3). Moreover, the number of points used to construct the linear regression and the percentage of maximum speed reached (% V_{max}) were extracted. V_{max} was determined as the maximal speed reached by the player during either training sessions or matches over the last 18 months. The accuracy of V_{max} was verified with the three best performances (Buchheit et al., 2021). The average of each combination of a given period (i.e., 1, 2, 3, 4 or 5 days) was used for analysis. The same process was used to create an A-S profile

with different combinations but without the inclusion of any specific sprint sessions to avoid any bias induces by linear sprinting in the analysis.

2.5. Statistical analyses

Statistical analyses were performed using R statistical software (R v4.0.2, R Foundation for Statistical Computing). Data are presented as mean $\pm$ standard deviation (SD) and data in parenthesis indicate the ranges of values observed in this study (minimal – maximal). The week-to-week reliability for each variable (A_0 , S_0 , AS_{slope}) was calculated through the change in the mean and the standard error of measurement (SEM) both expressed in raw units and in percentage of mean values. Moreover, the smallest worthwhile change ($0.2 \times$ between-athletes SD) (SWC) was calculated. The sensitivity (i.e., the ability of a test to exemplify meaningful changes in performance or fitness) was classified as follows: good ($CV < SWC$), acceptable ($CV = SWC$) or poor ($CV > SWC$) (Hopkins, 2004). The quality of the linear fitting of the A-S relationships was estimated with R^2 value.

3. Results

Descriptive values are displayed in Table 1. A_0 ranged from 5.14 to 8.62 m.s^{-2} when including a specific sprint session and from 5.24 to 9.22 m.s^{-2} in combinations without a specific sprint session. S_0 ranged from 7.38 to 12.09 m.s^{-1} when including a specific sprint session and from 6.23 to 9.55 m.s^{-1} in combinations without a specific sprint session.

Data related to the reliability of A-S profile are presented in Table 2 and Table 3. Without a sprint session, mean bias ranged from -8.4% to 20.8% and from -9.3% to 3.4% for S_0 and A_0 respectively which led to a poor sensitivity. Yet, when including a sprint-specific session, the mean bias ranged from -2% to 1.1% and from -8.1% to 0.2% for S_0 and A_0 respectively.

4. Discussion

The aims of this study were to describe differences in the A-S profile *in-situ* and to assess its week-to-week reliability over a given training cycle among elite youth soccer players in relation to the number of sessions included and analyse the effect of the inclusion or not of a specific sprint session. The main findings of the study showed that 1) the number of sessions affected mainly S_0 while A_0 remained similar, 2) the effect of a specific sprint session was important regarding S_0 and moderate regarding A_0 , and 3) while the number of sessions do not affect the reliability of the A-S profile *in-situ*, it appears that the reliability is related to the presence of the specific sprint session (i.e., a specific range of points). Considering the novelty of this concept, several methodological considerations needed to be addressed before it could be confidently implemented. In turn, we first aimed to understand how the number of soccer training sessions may influence the A-S profile. Interestingly, the different number of sessions (and to a lesser extent their content) had an important effect on S_0 . When the sprint-specific session was excluded (i.e., 1, 2, 3, 4 sessions), the more sessions included, the higher observed S_0 was (one session, from 6.23 to 8.45 m.s^{-1} ; two sessions, from 6.64 to 9.01 m.s^{-1} ; three sessions, from 6.79 to 9.25 m.s^{-1} ; all sessions: from 6.96 to 9.55 m.s^{-1}). In contrast, with only one specific sprint session, similar S_0 were observed (from 8.17 to 12.09 m.s^{-1}). Consequently, according to the number and the content of sessions, the values obtained for S_0 may be underestimated (no maximal speed exposure) or overestimated (maximal speed exposure but not enough points in the model) compared to those presented in previous studies: $9.34 \pm 0.49 \text{ m.s}^{-1}$ (Morin et al., 2021), $9.47 \pm 0.52 \text{ m.s}^{-1}$ (Alonso-Callejo et al., 2022) and $9.18 \pm 0.58 \text{ m.s}^{-1}$ (López-Sagarra et al., 2022). However, with a full week of data, included a high number of points but also high-speed exposure, S_0 values (from $9.39 \pm 0.81 \text{ m.s}^{-1}$

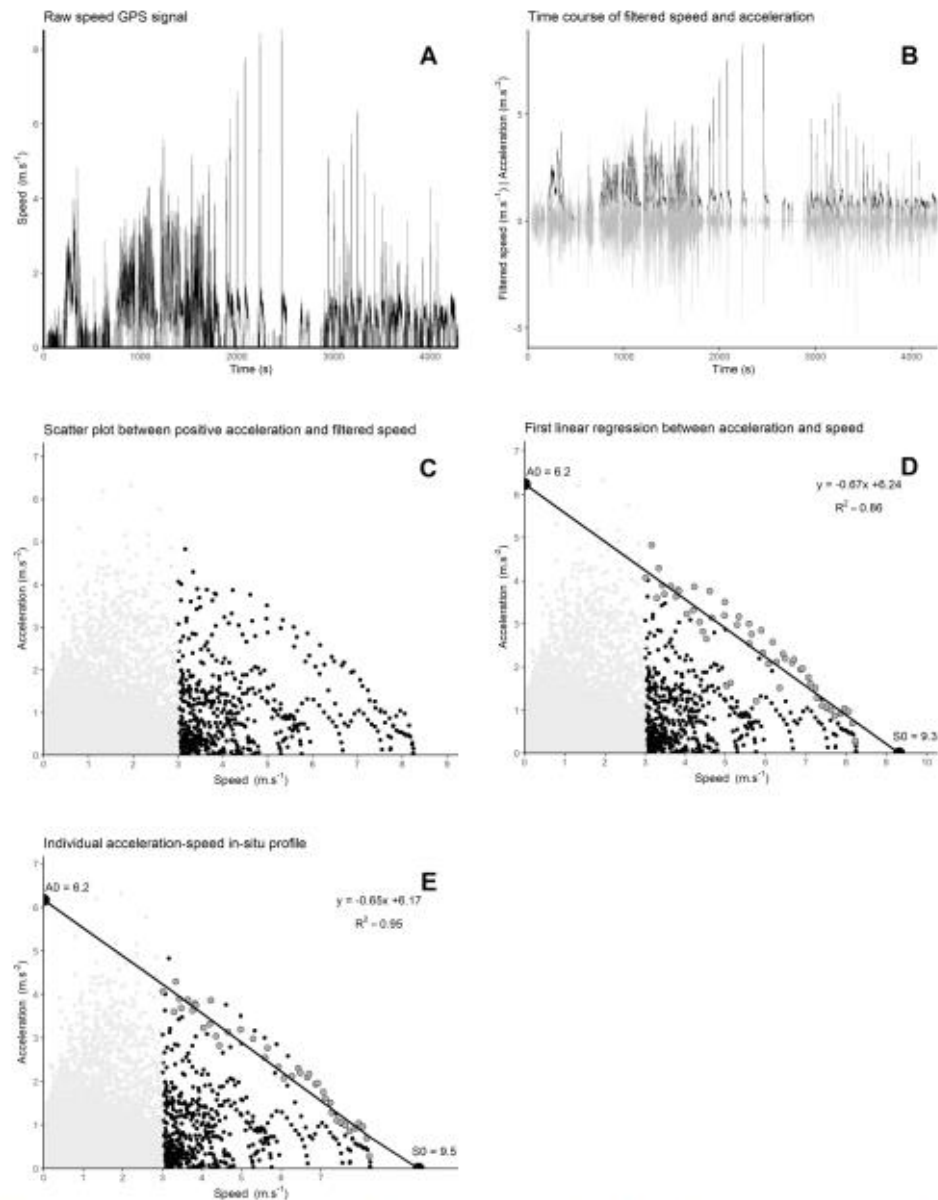


Fig. 2. Step-by-step methodology to construct a typical example acceleration-speed (A-S) profile *in-situ* from GPS data from a training session included two 30-m sprints (individual session) in an elite soccer player. Fig. 2A. Time course of the raw speed (m.s^{-1}) provided by the GPS device for an individual session. Fig. 2B. Time course of the filtered speed (m.s^{-1}) in black and time course of acceleration (m.s^{-2}) in grey for an individual session. The filtered speed-time data was calculated from a recursive filter and the acceleration was determined as the rate of change of the filtered speed. Fig. 2C. Scatterplot showing the relationship of the filtered speed data (X axis) and the positive acceleration data (Y axis) for an individual session. Points below the 3 m.s^{-1} threshold were grey out for the clarity. Fig. 2D. Scatterplot showing the relationship of the filtered speed data and the positive acceleration data (Y axis). First linear regression (black line) fitted from the two maximal values (grey points) of acceleration for each 0.2 subintervals from 3 m.s^{-1} to the individual maximal speed for an individual session. Fig. 2E. Typical example of an individual A-S profile *in-situ* obtained from the data of a training session in an elite soccer player. The line shows the linear profile from which the theoretical maximal acceleration ($A_0 = 6.2 \text{ m.s}^{-2}$) and theoretical maximal speed ($S_0 = 9.5 \text{ m.s}^{-1}$) were determined.

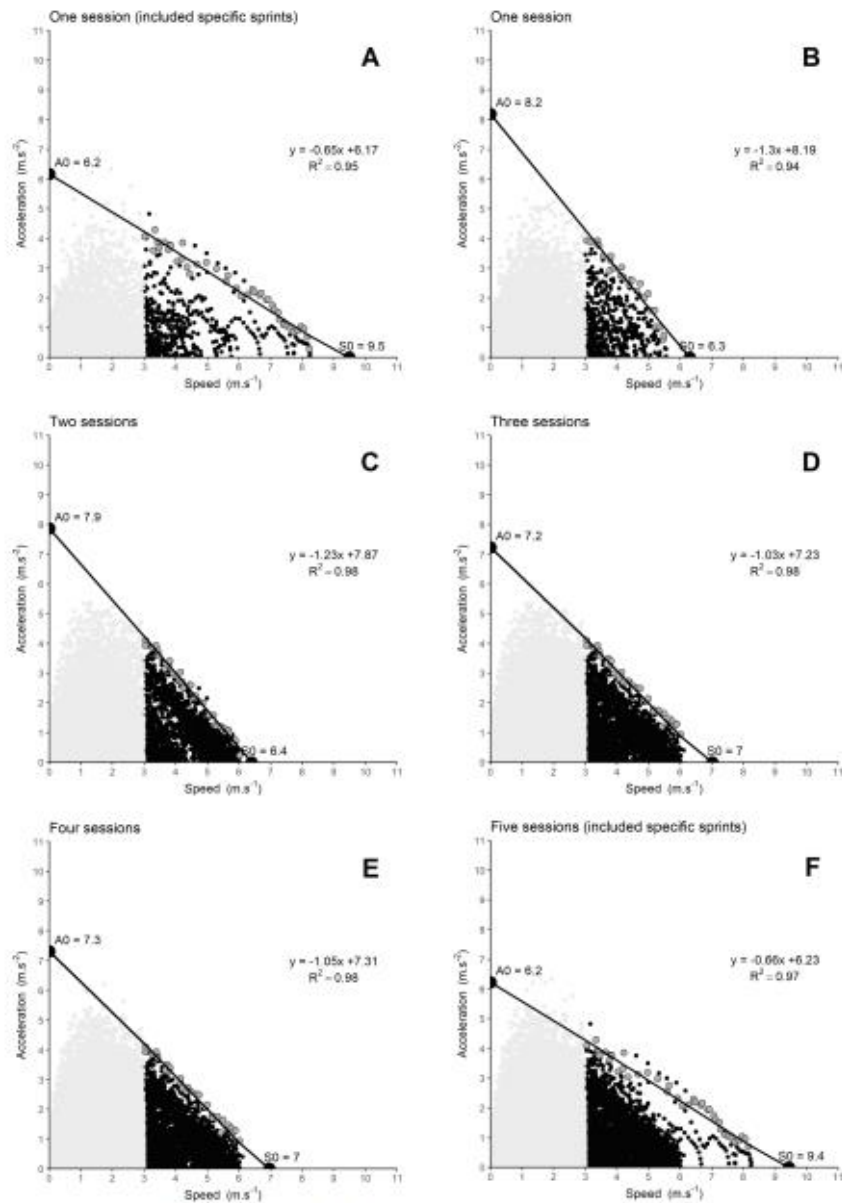


Fig. 3. Typical example of an individual acceleration-speed (A-S) profile *in-situ* obtained from the data of various number and content of sessions in elite youth soccer player. The line shows the linear profile from which the theoretical maximal acceleration (A_0) and theoretical maximal speed (S_0) were determined. The larger gray dots are the points used to construct the linear regression. Points below the 3 m.s^{-1} threshold were grey out for the clarity. Fig. 3A. Individual A-S profile *in-situ* of an elite youth soccer player based on a specific sprint session with two 30-m sprints ($A_0 = 9.5 \text{ m.s}^{-2}$ and $S_0 = 6.2 \text{ m.s}^{-1}$). Fig. 3B. Individual A-S profile *in-situ* of an elite youth soccer player based on a random soccer training session without specific sprint exercises ($A_0 = 8.2 \text{ m.s}^{-2}$ and $S_0 = 6.3 \text{ m.s}^{-1}$). Fig. 3C. Individual A-S profile *in-situ* of an elite youth soccer player based on two random soccer training sessions without specific sprint exercises ($A_0 = 7.9 \text{ m.s}^{-2}$ and $S_0 = 6.4 \text{ m.s}^{-1}$). Fig. 3D. Individual A-S profile *in-situ* of an elite youth soccer player based on three random soccer training sessions without specific sprint exercises ($A_0 = 7.2 \text{ m.s}^{-2}$ and $S_0 = 7.0 \text{ m.s}^{-1}$). Fig. 3E. Individual A-S profile *in-situ* of an elite youth soccer player based on four random soccer training sessions without specific sprint exercises ($A_0 = 7.3 \text{ m.s}^{-2}$ and $S_0 = 7.0 \text{ m.s}^{-1}$). Fig. 3F. Individual A-S profile *in-situ* of an elite youth soccer player based on five random soccer training sessions included a specific sprint session with two 30-m sprints ($A_0 = 6.2 \text{ m.s}^{-2}$ and $S_0 = 9.3 \text{ m.s}^{-1}$).

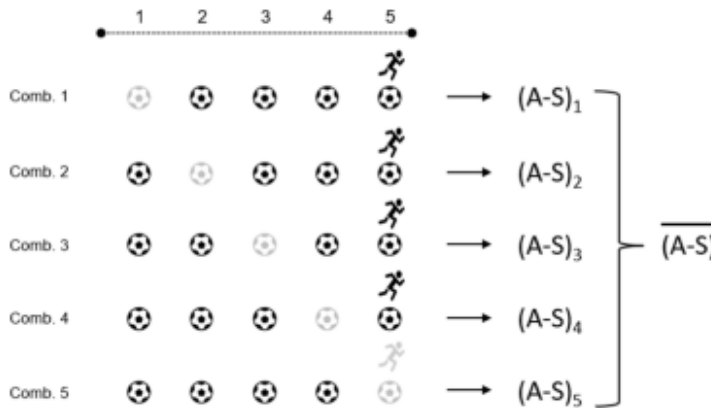


Fig. 4. Example for 4 sessions in a week of 5 sessions: $\binom{5}{4} = 5$ combinations. The first combination (Comb. 1) is to construct the $(A-S)_1$ profile with the sessions 2, 3, 4 and 5. (Comb. 2) is to construct the $(A-S)_2$ profile with the sessions 1, 3, 4 and 5. (Comb. 3) is to construct the $(A-S)_3$ profile with the sessions 1, 2, 4 and 5. (Comb. 4) is to construct the $(A-S)_4$ profile with the sessions 1, 2, 3 and 5. (Comb. 5) is to construct the $(A-S)_5$ profile with the sessions 1, 2, 3 and 4. $(A-S)$ is the average of those 5 combinations.

s^{-1} to $9.61 \pm 0.36 \text{ m.s}^{-1}$) matches well with previous studies. Additionally, S_0 values coincide with the V_0 obtained from the classic F-V profile in soccer players: $9.25 \pm 0.61 \text{ m.s}^{-1}$ (Jiménez-Reyes et al., 2018), from $9.18 \pm 0.37 \text{ m.s}^{-1}$ to $9.31 \pm 0.55 \text{ m.s}^{-1}$ (Jiménez-Reyes et al., 2022) and $9.30 \pm 0.40 \text{ m.s}^{-1}$ (Haugen et al., 2020). Therefore, it seems that the number of sessions per se is likely not the most important factor to build robust/reliable profiles. As such, the collection of enough raw data points to cover the 0-to-almost maximal running speed spectrum is needed. This suggests that the session content (especially for the high-speed running domain) matters more than the number of sessions itself and thus raw data points used. Although, the exact range of points necessary is yet to be known and could be determined in further research through numerical simulation. Unlike the F-V profile, the set-up of a standardized procedure is not needed to build an A-S profile. From a practical standpoint, encompassing either matches or maximal speed exposure, could be considered as a minimal amount of information to build a reliable *in-situ* A-S profile if approximately 95% of maximal speed is reached. The ultimate goal is to reach maximal accelerations at different speed to construct the most reliable and valid A-S profile. However practitioners need to be careful as the occurrence of near-to-maximal speed running bouts is low in elite soccer and depends on match context, individual profile player and playing position (Buchheit et al., 2021). Alonso-Callejo et al. (2022) and Martín-García et al. (2018) showed significant differences between positions and microcycle days.

The main points to verify and ensure a reliable extrapolation of S_0 should be 1) a good density of raw points throughout the speed and acceleration spectrum, 2) maximal acceleration points around the threshold of 3 m.s^{-1} running speed (this may differ for other populations than male adult soccer players), and 3) the actual maximal running speed points included in the linear regression above 95% of maximum speed. In addition, it is strongly recommended that typical raw data clouds are displayed in addition to the main outcomes when using the *in-situ* A-S profile concept in sports science works, since the reliability of the outcomes depends on the above-mentioned characteristics of the raw data cloud.

In contrast to S_0 , A_0 (which conceptually corresponds to the maximal acceleration thus horizontal ground force production capability of the players) was less sensitive to either the sessions content (especially the sprint content) or the number of sessions. This is likely due to the chaotic nature of soccer where important starting and stopping movements and number of change of directions are required during practice. Consequently, maximal acceleration value is likely reached more often and more consistently during normal training practice rather than during an isolated sprinting session, compared to maximal running speed. The difficulty to reach maximal speed, especially during trainings but also

during matches, is due to soccer-related constraints with players rarely having the opportunity to perform a maximal 30- to 40-m sprint (which requires a few seconds of linear sprint actions). During matches, most of the sprints are of shorter distances (90% < 5 s) and not long enough to reach maximal speed (Di Salvo et al., 2010 & Andrzejewski et al., 2013). Low-intensity accelerations required significantly greater V_0 than high-intensity accelerations (Oliva-Lozano et al., 2020). So high-intensity acceleration could be produced at any time in the training session (low V_0). Additionally, maximum velocity increases with pitch size (Gaudino et al., 2014; Casamichana & Castellano, 2010) while the number of accelerations (and deceleration) decrease (Hodgson et al., 2014). This reason could explain why we found that maximal acceleration is less sensitive than speed to the training content. Moreover, the higher density in small-sided games could explain the higher number of accelerations. Indeed, players performed the same number of accelerations in a 4 vs. 4 as in match (Hodgson et al., 2014; Dalen et al., 2021). Hence, the number of sessions or their content does not seem to be a critical factor to correctly assess A_0 .

The main findings for the week-to-week reliability of the A-S profile related S_0 , A_0 and AS_{slope} showed that the typical error (i.e. random error) ranged respectively from 4.68 to 5.20%, 4.36 to 5.26% and 8.71 to 8.81%. These results are similar to those provided by Morin and colleagues regarding A_0 (5.38%), and closer regarding S_0 (3.31%) and AS_{slope} (7.64%). The small variation between weeks regarding S_0 and AS_{slope} could be explained by the difference in exposure to maximal speed since training content cannot be perfectly controlled in elite soccer. Nevertheless, typical errors must be considered in relation with the change in a variable (signal) and its usual SWC (Buchheit, 2014). A-S profile variables presented CVs superior to SWCs, suggesting that only moderate-to-large effect can be detected (Buchheit, 2014). Despite this limited signal-to-noise ratio, the cost/benefit of the concept is promising. A wider range of mean bias regarding S_0 (i.e. systematic error) was observed between W1 and W2 (i.e., from -10 to 22 %) compared to W2 to W3 (i.e., from -9 to 4 %). Likewise, the mean bias regarding A_0 was larger between W1 and W2 (i.e., from -7 to -9 %) compared to W2 to W3 (i.e., from 1 to 3 %) without specific sprint session. The larger variability regarding mean bias is likely due to the difference in session content (tactical instructions, type of drills or matches, physical content) between weeks, that could not be perfectly controlled in this high-level practice setting. Indeed, during the W1 of the study, only physical content, technical exercises, and small-sided games were included while during W2 and W3 large-sided games similar to a game (10 vs 10 players + 2 GKs played on a 104 × 68-m pitch) were included. Thus, the A-S profile is sensitive to both sprinting sessions and other characteristics of the training session, especially playing size games.

Table 1

Main variables characterizing A-S profile according to combinations of number of sessions. Data are presented as mean $\pm$ SD and data in parenthesis indicate the range of values observed (minimal – maximal) for each combination of number of sessions. “Sprint” stands for the sprinting session. 1, 2 and 3 stand respectively for combinations of 1, 2 and 3 sessions without the inclusion of the sprinting session. “All ex. sprint” stands for the inclusion of all sessions of the week without the sprinting session. “All” stands for the inclusion of all sessions of the week. S_0 : maximal theoretical running speed; A_0 : maximal theoretical acceleration; AS_{slope} : orientation (slope) of the acceleration-speed linear relationship; R^2 : the linear fitting; % Vmax: the percentage of maximum speed reached.

Variables	Sessions	Week1	Week2	Week3
S_0	Sprint	9.87 $\pm$ 0.63 (8.91–11.07)	9.77 $\pm$ 0.56 (8.24–10.41)	9.86 $\pm$ 0.86 (8.17–12.09)
	1	6.69 $\pm$ 0.38 (6.23–7.52)	8.07 $\pm$ 0.28 (7.29–8.45)	7.47 $\pm$ 0.29 (6.9–7.96)
	2	7.19 $\pm$ 0.32 (6.64–8.09)	8.63 $\pm$ 0.28 (7.78–9.01)	7.94 $\pm$ 0.36 (7.39–8.4)
	3	7.35 $\pm$ 0.32 (6.79–8.09)	8.85 $\pm$ 0.34 (7.86–9.25)	8.1 $\pm$ 0.4 (7.54–8.61)
	All ex. sprint	7.45 $\pm$ 0.33 (6.96–8.07)	9.04 $\pm$ 0.4 (7.9–9.55)	8.16 $\pm$ 0.44 (7.47–8.84)
	All	9.53 $\pm$ 0.76 (7.38–10.76)	9.61 $\pm$ 0.36 (9.14–10.28)	9.39 $\pm$ 0.81 (7.63–11.17)
A_0	Sprint	6.82 $\pm$ 0.48 (5.81–7.67)	6.56 $\pm$ 0.51 (5.44–7.72)	6.02 $\pm$ 0.59 (5.14–7.46)
	1	7.64 $\pm$ 0.5 (6.48–8.46)	7.07 $\pm$ 0.64 (5.24–7.99)	7.12 $\pm$ 0.43 (6.49–8.23)
	2	7.87 $\pm$ 0.48 (7.25–8.79)	7.13 $\pm$ 0.57 (5.49–7.88)	7.27 $\pm$ 0.36 (6.87–8.11)
	3	8.02 $\pm$ 0.57 (7.34–9.13)	7.27 $\pm$ 0.67 (5.36–8.28)	7.43 $\pm$ 0.41 (6.85–8.29)
	All ex. sprint	8.11 $\pm$ 0.69 (7.2–9.22)	7.39 $\pm$ 0.79 (5.36–8.89)	7.54 $\pm$ 0.46 (6.91–8.48)
	All	7.3 $\pm$ 0.55 (6.23–8.35)	7.3 $\pm$ 0.41 (6.7–8.28)	6.96 $\pm$ 0.54 (6.08–8.62)
AS_{slope}	Sprint	–0.7 $\pm$ 0.08 (–0.86 – –0.53)	–0.68 $\pm$ 0.09 (–0.94 – –0.53)	–0.62 $\pm$ 0.11 (–0.91 – –0.44)
	1	–1.17 $\pm$ 0.12 (–1.37 – –0.96)	–0.9 $\pm$ 0.09 (–1.09 – –0.69)	–0.97 $\pm$ 0.08 (–1.13 – –0.82)
	2	–1.11 $\pm$ 0.09 (–1.28 – –0.9)	–0.83 $\pm$ 0.07 (–1.02 – –0.66)	–0.92 $\pm$ 0.07 (–1.1 – –0.83)
	3	–1.1 $\pm$ 0.1 (–1.31 – –0.93)	–0.83 $\pm$ 0.1 (–1.06 – –0.58)	–0.92 $\pm$ 0.08 (–1.1 – –0.8)
	All ex. sprint	–1.09 $\pm$ 0.12 (–1.31 – –0.9)	–0.82 $\pm$ 0.12 (–1.12 – –0.58)	–0.93 $\pm$ 0.09 (–1.11 – –0.79)
	All	–0.78 $\pm$ 0.11 (–1.08 – –0.61)	–0.76 $\pm$ 0.06 (–0.89 – –0.68)	–0.75 $\pm$ 0.12 (–1.06 – –0.56)
R^2	Sprint	0.96 $\pm$ 0.03 (0.87–0.99)	0.97 $\pm$ 0.03 (0.88–0.99)	0.95 $\pm$ 0.03 (0.89–0.98)
	1	0.9 $\pm$ 0.03 (0.84–0.96)	0.94 $\pm$ 0.04 (0.81–0.98)	0.92 $\pm$ 0.03 (0.85–0.97)
	2	0.95 $\pm$ 0.02 (0.9–0.98)	0.97 $\pm$ 0.03 (0.85–0.98)	0.96 $\pm$ 0.01 (0.94–0.99)
	3	0.96 $\pm$ 0.02 (0.92–0.98)	0.97 $\pm$ 0.04 (0.83–0.99)	0.97 $\pm$ 0.01 (0.96–1)
	All ex. sprint	0.96 $\pm$ 0.02 (0.92–0.98)	0.97 $\pm$ 0.04 (0.83–0.99)	0.98 $\pm$ 0.01 (0.96–1)
	All	0.97 $\pm$ 0.02 (0.92–0.99)	0.99 $\pm$ 0.01 (0.97–0.99)	0.98 $\pm$ 0.01 (0.95–0.99)
Numbers of points used to fit the regression line (N)	Sprint	38.9 $\pm$ 2.6 (34–44)	40.2 $\pm$ 3.7 (33–46)	40.6 $\pm$ 3.8 (35–48)
	1	28.9 $\pm$ 5.8 (12–39)	34.8 $\pm$ 1.6 (32.3–38.2)	32.7 $\pm$ 4.6 (20–43)
	2	32.2 $\pm$ 3 (24–39)	37.8 $\pm$ 1.6 (34.7–40.5)	35.6 $\pm$ 2.6 (28–43)
	3	33.2 $\pm$ 2.5 (28–39)	39.2 $\pm$ 2.1 (35–42.4)	36.7 $\pm$ 2.5 (32–43)
	All ex. sprint	33.6 $\pm$ 2.3 (30–38)	41.6 $\pm$ 4 (35–49)	37.1 $\pm$ 2.5 (33–43)
	All	38.8 $\pm$ 3.2 (34–44)	41.3 $\pm$ 2.9 (37–46)	39.1 $\pm$ 3.4 (32–46)
% Vmax	Sprint	94.4 $\pm$ 2.9 (86.5–98.6)	94.9 $\pm$ 4.2 (82.4–99.4)	93.8 $\pm$ 4 (81–99.8)
	1	65.1 $\pm$ 8.3 (44.5–82.6)	79.1 $\pm$ 10.1 (51.9–98.1)	73.3 $\pm$ 9.1 (55.2–90.8)
	2	70.1 $\pm$ 5.3 (58.3–82.6)	85.5 $\pm$ 5.8 (72.9–98.1)	79.2 $\pm$ 6 (60.6–90.8)
	3	72.1 $\pm$ 4.5 (61.3–82.6)	87.7 $\pm$ 5.3 (76.1–98.1)	81.7 $\pm$ 4.8 (70.5–90.8)
	All ex. sprint	73.2 $\pm$ 4.2 (67.2–82.6)	90 $\pm$ 4.3 (83.3–98.1)	82.5 $\pm$ 4.6 (73.7–90.8)
	All	94.4 $\pm$ 2.9 (86.5–98.6)	96.1 $\pm$ 2.2 (91.4–99.4)	93.9 $\pm$ 3.6 (82.9–99.8)

Combining with the above-mentioned results where S_0 depended on a specific range of points, it is advised to consider at least a whole week of training with speed training or large-sided games included to obtain a reliable A-S profile. Alternatively, the data from a single official game could be considered as the game context should allow the player to cover the entire acceleration-speed spectrum, especially towards high-to-maximal running speeds (official professional game data not published²). Due to the complexity to organize regular sprint testing in elite sport environment (logistic, practitioners need the agreement of the technical staff, time-consuming, etc.), the A-S profile can be used as an alternative method to automatically monitor between-week changes and could be used by practitioners to monitor player physical status. It is important to highlight that the A-S profile is a new concept and only further studies, and applications will fully inform on its usefulness and added value. Indeed, a team that regularly tests players' maximal speed and acceleration capabilities week to week will have less benefit from using the A-S profile even if it would allow them to have a continuous and soccer-specific evaluation without testing. That said, only a very limited number of professional teams do so consistently, to our

knowledge. Although, *in-situ* profile might be advantageous in the long term as it allows monitoring individual players sprint capabilities during sport specific movements and especially during matches. Assessing and monitoring team sport players' individual sprint A-S profile (as force-velocity) could be an interesting tool to use retrospectively in the context of return to sport and injury management (Mendiguchia et al., 2014). Further studies are warranted to understand how those measures of A-S profile related to other valid physical construct such F-V profile or markers of neuromuscular fatigue (e.g. CMJ, box to box run) in order to be fully used in practice.

4.1. Limitations

While this pilot study highlighted some key methodological requirements regarding A-S profile, several limitations must be discussed. First and foremost, the comparison with a criterion measure such as linear sprint force-velocity profile is lacking. Indeed, despite the inclusion of a sprint session each week, the lack of control during its execution limited the extrapolation of F-V profile related variables (which was initially sought). Ongoing studies are undertaken to compare the current A-S and F-V profile related variables (e.g., S_0 vs. V_0 and A_0 vs. F_0) in order to understand what physical qualities are associated with the A-S profile. Second, the result of the present study highlighted that S_0 (and

² <https://jbmorin.net/2021/07/29/the-in-situ-sprint-profile-for-team-sport-s-testing-players-without-testing-them/>.

Table 2

Reliability of main variables characterizing A-S profile according combinations of number of sessions. Raw difference: change in the mean both expressed in raw units and in percentage of mean values; SEM: standard error of measurement both expressed in raw units and in percentage of mean values.

Variables	Sessions	Raw difference (W2 – W1)	Raw difference (W3 – W2)	Raw difference (%W2 from W1)	Raw difference (%W3 from W2)	SEM (W2 – W1)	SEM (W3 – W2)	SEM (%W2 from W1)	SEM (%W3 from W2)
S_0	Sprint	-0.11 ± 0.52	0.09 ± 0.58	-0.93	0.91	0.36	0.41	3.61	4.03
	1	1.37 ± 0.36	-0.59 ± 0.34	20.77	-7.28	0.26	0.24	4.35	2.91
	2	1.44 ± 0.38	-0.69 ± 0.43	20.22	-7.92	0.27	0.3	4.17	3.49
	3	1.49 ± 0.46	-0.75 ± 0.55	20.55	-8.35	0.33	0.39	4.98	4.31
	All ex. sprint	1.59 ± 0.5	-0.88 ± 0.64	21.58	-9.53	0.35	0.46	5.21	4.9
	All	0.06 ± 0.61	-0.19 ± 0.63	1.09	-2.02	0.43	0.44	5.2	4.68
A_0	Sprint	-0.26 ± 0.59	-0.54 ± 0.37	-3.52	-8.13	0.42	0.26	6.02	3.96
	1	-0.57 ± 0.65	0.05 ± 0.55	-7.26	1.36	0.46	0.39	6.09	6.43
	2	-0.76 ± 0.49	0.15 ± 0.57	-9.58	2.7	0.35	0.4	4.38	6.54
	3	-0.77 ± 0.55	0.18 ± 0.72	-9.48	3.29	0.39	0.51	4.86	8.35
	All ex. sprint	-0.74 ± 0.64	0.17 ± 0.86	-9.03	3.52	0.45	0.61	5.49	9.95
	All	-0.01 ± 0.55	-0.33 ± 0.45	0.21	-4.45	0.39	0.32	5.26	4.36
AS_{slope}	Sprint	0.02 ± 0.09	0.06 ± 0.06	-2.25	-8.61	0.07	0.04	9.3	6.58
	1	0.27 ± 0.14	-0.07 ± 0.1	-22.42	8.42	0.1	0.07	7.31	8.98
	2	0.28 ± 0.1	-0.09 ± 0.11	-24.5	11.63	0.07	0.07	5.75	9.91
	3	0.27 ± 0.12	-0.1 ± 0.14	-24.44	13.54	0.08	0.1	6.76	14.23
	All ex. sprint	0.27 ± 0.13	-0.11 ± 0.16	-24.68	15.83	0.09	0.11	7.41	16.91
	All	0.01 ± 0.11	0.01 ± 0.1	-0.2	-1.73	0.08	0.07	8.71	8.81

Table 3

Inter-week reliability analysis of main variables characterizing A-S profile. SEM: standard error of measurement. SWC: the smallest worthwhile change ($0.2 \times$ between-athletes SD). The sensitivity was classified as follows: good (CV < SWC), acceptable (CV = SWC) or poor (CV > SWC) where CV stands for the coefficient of variation.

Variables	Sessions	SEM	SWC	Sensitivity
S_0	Sprint	0.41	0.16	Poor
	1	0.26	0.05	Poor
	2	0.28	0.04	Poor
	3	0.34	0.04	Poor
	All ex. sprint	0.39	0.04	Poor
	All	0.41	0.11	Poor
A_0	Sprint	0.36	0.10	Poor
	1	0.39	0.08	Poor
	2	0.38	0.07	Poor
	3	0.45	0.08	Poor
	All ex. sprint	0.54	0.1	Poor
	All	0.36	0.08	Poor
AS_{slope}	Sprint	0.06	0.02	Poor
	1	0.09	0.01	Poor
	2	0.08	0.01	Poor
	3	0.09	0.01	Poor
	All ex. sprint	0.10	0.01	Poor
	All	0.07	0.02	Poor

therefore A-S profile) depended on a specific range of points (within the very high-speed domain). However, no official match data was included as it was conducted during the COVID-19 pandemic (although a friendly game was used) which is likely a limiting factor of the present investigation. Despite the inclusion of a match, our results suggest that it does not matter if a game is included or not. However, we acknowledge that future studies should include official data to further confirm the results of our study. Finally, the lack of control on players' status (e.g., fatigue, fitness) might have potentially affected the observed week-to-week variability. Therefore, controlling for these potential covariates would help to better understand how the A-S profile itself might fluctuate over time. In addition, since the GPS system used in the present study and the sampling rate is different from Morin et al.'s (2021) proof-of-concept study, further research is warranted to quantify the differences in A-S profiles induced by different position-speed measurement systems such

as GPS or local positioning systems. Also, regarding the methodological aspect, as Morin et al. (2021), a speed threshold of 3 m.s^{-1} was used. Rarely values of maximal acceleration were observed below this point for men professional soccer players, but considering younger subjects in academy, it would be interesting to gauge a speed threshold by sprint capabilities (consider level, sex, category, etc.).

4.2. Practical application

- S_0 is dependent on the session content. Practitioners need to ensure a sufficient range of raw points are included to provide meaningful information related to S_0 . In particular, maximal running speed points that are close to maximal speed must be present to ensure a better reliability. Ideally maximal running speed above 95% of individual maximum speed is advised.
- A_0 is not dependent of the session content. Practitioners don't need to make specific consideration although visual inspection of the "cloud" of data is likely needed (check if their entire spectrum is covered, especially maximal acceleration points around the threshold).
- The week-to-week reliability of A-S profile is not dependent of a specific number of sessions and the A-S profile is reliable. Practitioners can use this new monitoring tool to assess player physical status.

5. Conclusion

This study aimed to provide some key methodological considerations for practitioners regarding the integration of *in-situ* soccer A-S profile. The present study showed low week-to-week variability for A_0 , S_0 and AS_{slope} . However, practitioners need to consider including a sufficient number and range of raw data points and especially a high maximum percentage of maximum speed (i.e. > 95%) to build a clear and consistent linear regression and in turn extrapolate meaningful S_0 values. Further studies should consider including a match and comparing the results with a criterion measure (e.g. controlled linear sprint test force-velocity profile metrics).

CRediT authorship contribution statement

P. Clavel: Writing - review & editing. **J.-B. Morin:** Supervision, Validation. **M. Buchheit:** Validation. **M. Lacomme:** Methodology, Supervision, Validation.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

- Alonso-Callejo, A., García-Urribe, J., Pérez-Guerra, A., Gómez, D., Sánchez-Sánchez, J., Gallardo, L., Oliva-Lozano, J.M., Felipe, J.L., 2022. Effect of playing position and microcycle days on the acceleration speed profile of elite football players. *Sci. Rep.* 12 (1), 19266. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23790-w>.
- Andrzejewski, M., Chmura, J., Pluta, B., Strzelczyk, R., Kasprzak, A., 2013. Analysis of sprinting activities of professional soccer players. *J. Strength Cond. Res.* 27 (8), 2134–2140. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318279423c>.
- Blaževich, A., 2017. *Sports Biomechanics: The Basics - Optimising Human Performance*, third ed. Bloomsbury Sport.
- Buchheit, M., 2014. Monitoring training status with HR measures: do all roads lead to Rome? *Front. Physiol.* 5, 73. <https://doi.org/10.3389/fphys.2014.00073>.
- Buchheit, M., Simpson, B.M., Hader, K., Lacomme, M., 2021. Occurrences of near-to-maximal speed-running bouts in elite soccer: insights for training prescription and injury mitigation. *Sci. Med. Football* 5 (2), 105–110. <https://doi.org/10.1080/24733938.2020.1802058>.
- Casamichana, D., Castellano, J., 2010. Time-motion, heart rate, perceptual and motor behaviour demands in small-sides soccer games: effects of pitch size. *J. Sports Sci.* 28 (14), 1615–1623. <https://doi.org/10.1080/02640414.2010.521168>.
- Clavel, P., Leduc, C., Morin, J.B., Owen, C., Samozino, P., Peeters, A., Buchheit, M., Lacomme, M., 2022. Concurrent validity and reliability of sprinting force-velocity profile assessed with GPS devices in elite athletes. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 17 (10), 1527–1531. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2021-0339>.
- Dalen, T., Sundin, S., Stevens, T.G.A., Hjelde, G.H., Kjønsnes, T.N., Widoff, U., 2021. Differences in acceleration and high-intensity activities between small-sided games and peak periods of official matches in elite soccer players. *J. Strength Cond. Res.* 35 (7), 2018–2024. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003087>.
- Di Salvo, V., Baron, R., González-Haro, C., Gormaz, C., Pigozzi, F., Bachi, N., 2010. Sprinting analysis of elite soccer players during European Champions League and UEFA Cup matches. *J. Sports Sci.* 28 (14), 1489–1494. <https://doi.org/10.1080/02640414.2010.521166>.
- Gaudino, P., Alberti, G., Iaia, F.M., 2014. Estimated metabolic and mechanical demands during different small-sided games in elite soccer players. *Hum. Mov. Sci.* 36, 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2014.05.005>.
- Hader, K., Rumpf, M.C., Hertzog, M., Kilduff, L.P., Girard, O., Silva, J.R., 2019. Monitoring the athlete match response: can external load variables predict post-match acute and residual fatigue in soccer? A systematic review with meta-analysis. *Sports Med. - Open* 5 (1), 48. <https://doi.org/10.1186/s40798-019-0219-7>.
- Haugen, T.A., Tønnessen, E., Høidal, J., Seiler, S., 2014. The role and development of sprinting speed in soccer. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 9 (3), 432–441. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2013-0121>.
- Haugen, T.A., Breitschädel, F., Seiler, S., 2019. Sprint mechanical variables in elite athletes: Are force-velocity profiles sport specific or individual? *PLoS One* 14, e0215551. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215551>.
- Haugen, T.A., Breitschädel, F., Seiler, S., 2020. Sprint mechanical properties in soccer players according to playing standard, position, age and sex. *J. Sports Sci.* 38 (9), 1070–1076. <https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1741955>.
- Hodgson, C., Akenhead, R., Thomas, K., 2014. Time-motion analysis of acceleration demands of 4v4 small-sided soccer games played on different pitch sizes. *Hum. Mov. Sci.* 33, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2013.12.002>.
- Hopkins, W.G., 2004. How to interpret changes in an athletic performance test. *Sportscience* 8, 1–7.
- Jiménez-Reyes, P., García-Ramos, A., Piñaga-Montilla, J.A., Morcillo-Losa, J.A., Cuadrado-Peñafiel, V., Castaño-Zambudio, A., Samozino, P., Morin, J.B., 2022. Seasonal changes in the sprint acceleration force-velocity profile of elite male soccer players. *J. Strength Cond. Res.* 36 (1), 70–74. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003513>.
- Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., García-Ramos, A., Cuadrado-Peñafiel, V., Brugheili, M., Morin, J.B., 2018. Relationship between vertical and horizontal force-velocity-power profiles in various sports and levels of practice. *PeerJ*. <https://doi.org/10.7717/peerj.5937>.
- Lacomme, M., Owen, C., Peeters, A., Piacione, J., Lemaire, Y., Leduc, C., 2020. Force velocity profiling with GPS: is it reliable? *Sport Performance Sci. Reports* 1 (August), 5–7.
- López-Sagarrá, A., Baena-Raya, A., Cosimiro-Artés, M.A., Granero-Gill, P., Rodríguez-Pérez, M.A., 2022. Seasonal changes in the acceleration-speed profile of elite soccer players: a longitudinal study. *Appl. Sci.* 12 (24), 12987. <https://doi.org/10.3390/app122412987>.
- Malone, J.J., Lovell, R., Varley, M.C., Coutts, A.J., 2017. Unpacking the Black Box: Applications and Considerations for using GPS Devices in Sport. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 12, 18–26. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2016-0236>.
- Martín-García, A., Gómez Díaz, A., Bradley, P.S., Morera, F., Casamichana, D., 2018. Quantification of a professional football team's external load using a microcycle structure. *J. Strength Cond. Res.* 32 (12), 3511–3518. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002816>.
- Morin, J.B., Le Mat, Y., Ognach, C., Di Prampero, P.E., Samozino, P., 2021. The “in-situ” acceleration-speed profile for team sports: testing players without testing them. Available from: <<https://bmorin.net/2021/07/29/the-in-situ-sprint-profile-for-team-sports-testing-players-without-testing-them/>>.
- Morin, J.B., Samozino, P., 2016. Interpreting power-force-velocity profiles for individualized and specific training. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 11 (2), 267–272. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2015-0638>.
- Morin, J.B., Samozino, P., Murata, M., Cross, M.R., Nagahara, R., 2019. A simple method for computing sprint acceleration kinetics from running velocity data: replication study with improved design. *J. Biomech.* 94, 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.07.020>.
- Mendiguchia, J., Samozino, P., Martínez-Ruiz, E., Brugheili, M., Schmitt, S., Morin, J.B., Mendez-Villanueva, A., 2014. Progression of mechanical properties during on-field sprint running after returning to sports from a hamstring muscle injury in soccer players. *Int. J. Sports Med.* 35, 690–695. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1363192>.
- Morin, J.B., Le Mat, Y., Ognach, C., Barnabò, A., Pilati, A., Samozino, P., di Prampero, P.E., 2021a. Individual acceleration-speed profile in-situ: a proof of concept in professional football players. *J. Biomech.* 123, 110524. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110524>.
- Nagahara, R., Maebayashi, T., Matsuo, A., Zushi, K., 2014. Kinematics of transition during human accelerated sprinting. *Biol. Open* 3, 689–699. <https://doi.org/10.1242/bio.20148284>.
- Oliva-Lozano, J.M., Fortes, V., Krstrup, P., Muyor, J.M., 2020. Acceleration and sprint profiles of professional male football players in relation to playing position. *PLoS one* 15 (8), e0236959. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236959>.
- Samozino, P., Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Peyron, N., Saez de Villarreal, E., Morin, J.B., 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. <https://doi.org/10.1111/sms.12490>.

Annexe 4 - Besoin de tester ? Comparaison entre le profil force-vitesse en sprint et le profil accélération-vitesse *in-situ* chez les jeunes footballeuses élites

1 Original Article

2 Title: Is it worth testing? A comparison between force-velocity profile and acceleration-speed
3 profile *in-situ*

4 Authors: Clavel P^{1,2}, Leduc C^{3,4}, Morin J-B⁵, Buchheit M^{2,6,7,8,9}, Lacombe M^{2,10}

5 Institutions and Affiliations:

6 ¹ Performance Department, Paris Saint-Germain FC, Saint-Germain-en-Laye, France

7 ² French Institute of Sport (INSEP), Laboratory Sport, Expertise and Performance (EA 7370),
8 Paris, France

9 ³ Carnegie Applied Rugby Research (CARR) center, Institute for Sport, Physical Activity and
10 Leisure, Carnegie School of Sport, Leeds Beckett University, Leeds, United Kingdom

11 ⁴ Sport Science and Medicine Department, Crystal Palace FC, London (United Kingdom)

12 ⁵ Université Jean Monnet Saint-Etienne, Lyon 1, Université Savoie Mont-Blanc, Laboratoire
13 Interuniversitaire de Biologie de la Motricité, F-42023, Saint-Etienne, France.

14 ⁶ HIITScience, Revelstoke, BC, Canada

15 ⁷ Institute for Health and Sport, Victoria University, Melbourne, VIC, Australia

16 ⁸ Kitman Labs, Performance Research Intelligence Initiative, Dublin, Ireland

17 ⁹ Lille OSC, Performance Department, Lille, France

18 ¹⁰ Performance and Analytics department, Parma Calcio 1913, Parma, Italy

19 *Contact details:*

20 Pauline Clavel

21 Paris Saint-Germain FC, Saint-Germain-en-Laye, France

22 Email: paulineclavel06@gmail.com

23 Mobile: +33 6 67 10 03 19

24

25 Abstract count: 267

26 Text only word count:

27 Numbers of tables: 3

28 Numbers of figures: 3

29 **Key words:** GPS, sprint performance, testing, monitoring

54 Introduction

55 Human neuromuscular capabilities are key performance indicators in several team sports
56 (Faude et al., 2012; Haugen et al., 2014). Due to the increasing physiological demands and the
57 rise of congested fixtures in elite sport environment, assessing and monitoring players'
58 neuromuscular status is primordial as it may help practitioners adapt training contents at the
59 individual level as well as evaluate the effect of different training program non-invasively
60 (Leduc et al., 2019).

61 Individual sprint acceleration force-velocity (F-V) profile (Morin & Samozino, 2016) has been
62 used in both practice and research (Mendiguchia et al., 2014) to assess individual sprint
63 capabilities. This concept allows to determine the maximal capacities of the players to produce
64 force (F_0), velocity (V_0), and power (P_{max}). Recent studies showed that GPS technology
65 represent a valid and reliable alternative to radar device or linear encoder to compute F-V profile
66 (Lacome et al., 2020; Clavel et al., 2022). While GPS devices solve several practical issues (i.e.
67 no set-up and automatic analyses), several challenges remain when assessing F-V profile in
68 elite soccer environment. Indeed, time is scarce, and it may be difficult for practitioners to
69 dedicate a specific part of the training session because of standardised protocols as well as
70 coaches and players themselves can be reluctant to perform such tests as they require maximal
71 effort (Leduc et al., 2019).

72 Based on these limitations and the increasing accuracy and popularity of GPS technology in
73 sport, Morin et al. (2021) developed a new method called acceleration-speed (A-S) profile *in-*
74 *situ* (i.e., during specific sport activity). The idea is to obtain an individual sprint acceleration
75 mechanical profile theoretically equivalent to the F-V profile from data collected through daily
76 practices "passively" (i.e., no additional equipment than GPS neither standardized maximum
77 linear sprint). Daily data pooled are used to build a linear relationship between speed (X axis)
78 and acceleration (Y axis) during a specific sport activity (e.g. training, match) allowing to
79 extrapolate theoretical maximal capacities of the players to produce acceleration (A_0) and speed
80 (S_0). The A-S and F-V profiles differ in that one is derived from football situations while the
81 other from a maximal linear sprint task but are conceptually very close. Indeed, S_0 and V_0 both
82 describe the theoretical maximal running speed and by Newtonian laws of motion (Force =
83 mass * acceleration) A_0 and F_0 share the same capacity (maximal capacity in the forward
84 direction of motion or the corresponding ground reaction force antero-posterior) when express
85 relative to body mass (i.e. $m.s^{-2}$ vs $N.kg^{-1}$ and $N = kg^{-1}.m.s^{-2}$). They only differ by the amount

86 of air friction which is null at the beginning of the sprint i.e. Y-axis intercept (Smith & Johnson,
 87 2018). Morin et al. (2021) found typical values close to those reported in professional male
 88 soccer players (Jiménez-Reyes et al., 2018, 2020; Haugen et al., 2019, 2020) regarding S_0 vs
 89 V_0 (9.0 to 10.0 m.s⁻¹ vs 9.2 to 9.3 m.s⁻¹) and A_0 vs F_0 (7.2 to 7.7 m.s⁻² vs 7.1 to 9.0 N.kg⁻¹).
 90 Lopez-Sagarra et al. (2022) found similar results with an average team season acceleration
 91 value of 6.2 ± 0.5 m.s⁻² and speed value of 9.2 ± 0.6 m.s⁻¹. Clavel et al. (2023) studied the week-
 92 to-week reliability of the A-S profile according to the number of sessions and the presence of
 93 sprints. The A-S profile has been shown reliable when the entire spectrum of raw data points is
 94 covered (maximal acceleration points around the 3 m/s threshold and maximal running speed
 95 close to maximal speed) whereas it has been shown unreliable when constructed from a
 96 consistent cloud of points and non-maximal values of acceleration and speed and then only
 97 describe the neuromuscular activity. This results are supported by Alonso-Callejo et al. (2022)
 98 which showed that the A-S profile was depending on position and microcycle days (A_0 ranges
 99 from 5.7 to 8.7 m.s⁻² and S_0 ranges from 5.5 to 9.5 m.s⁻¹). Moreover, Clavel et al. (2023) showed
 100 that A-S profile built from few points with an inconsistent cloud of points will lead to aberrant
 101 values and does not make any sense (for example $S_0 = 12.09$ m.s⁻¹).

102 While this concept is theoretically very close to the F-V profile and sounds promising to assess
 103 and monitor neuromuscular maximal capacities of the players, especially given that it has been
 104 shown to be reliable under certain conditions (Morin, 2021; Clavel et al., 2023), the validity of
 105 this approach is yet to be known and no precedent study assessed it.

106 Therefore, the aims of this study were (1) to assess the concurrent validity of A-S profile against
 107 F-V profile variables and (2) describe the effect of resistance training program on A-S and F-V
 108 profile variables to quantify the magnitude of the association between the two profiles.

109

110 **Method**

111 **Subjects**

112 Seventeen female elite U19 soccer players (age: 17.2 ± 0.9 years, height: 166.0 ± 5.2 years,
 113 body mass: 58.6 ± 10.4 kg) were included as part of the training plan and were volunteered to
 114 participate in the study. They gave their written informed consent to participate in this study,
 115 which was approved by the local ethical committee in agreement with the Declaration of
 116 Helsinki.

117

118 **Study design**

119 Data were collected from five consecutive weeks among elite female soccer players included
120 training sessions (combination of technical, physical and tactical practices) and matches. Each
121 training week was composed of four sessions performed on an artificial grass pitch. In addition
122 to the typical training sessions, a resistance training program were included in the procedure
123 (Fig. 1). Two endurance-strength gym sessions and one force-velocity field training by week
124 were implemented. All players were supervised by the strength and conditioning coach during
125 the entire intervention period and had little experience in strength training and force-velocity
126 field training.

127

*** Insert Figure 1 ***

128 The gym sessions were organized as a circuit training before on-field training and lasted 45
129 minutes. Players performed 4 laps of the circuit consisting of six exercises focusing on lower
130 limbs. The six exercises combined Copenhagen plank, half squat, hip thrust, kettlebell swing,
131 box jump and Nordic hamstring. Box heights and load were adjusted for each athlete and were
132 gradually increased while repetitions decreased during the five weeks as described in Table 1.

133

*** Insert Table 1 ***

134 The speed field training was performed identically at the beginning of a soccer training sessions
135 and lasted 25 minutes. It included a warm-up (light jogging, strengthening exercises, running
136 drills, dynamic stretching, core and agility exercises) followed by resistance bands exercises
137 and three speed exercises following by increased accelerations over various distances
138 (respectively 10, 15 and 20-m). At the end, athletes performed two maximal 30-m sprints from
139 a static standing position with 4 minutes rest before trials.

140 Sessions were recorded for each athlete with a 10-Hz GPS unit including a double constellation
141 system (APEX, STATSports, North Ireland). GPS units were activated 15 min prior to warm-
142 up to ensure a good signal quality and switched off immediately following the session. Each
143 GPS unit was placed in a sports vest and worn under the playing jersey. The horizontal dilution
144 of precision of the signal and the number of satellites per session were 0.46 ± 23 and $20.01 \pm$
145 0.89 respectively which characterizes good signal quality (Malone et al., 2017).

146

147

148 **Data processing**

149

150 **Force-Velocity profile**

151 F-V profile was assessed twice weekly at the middle of the week from two maximal 30-m
152 sprints performed at the end of the speed field training described above.

153 The variables of interest of the F-V profile were calculated through a custom-made script with
154 R statistical software (R v4.0.2, R Foundation for Statistical Computing). It was previously
155 validated and explained by Clavel et al. (2022) based on the computation method presented by
156 Samozino et al. (2016) and Morin et al. (2019). The best F-V profile is determined as the profile
157 maximizing maximal power output. F_0 , V_0 and $(F-V)_{\text{slope}}$ was determined per subject per week.

158

159 **Acceleration-Speed profile *in-situ***

160 To ensure a reliable construction of the profile (Clavel et al., 2023), A-S profile was assessed
161 weekly from data collected during trainings (regular and force-velocity training) and match.
162 The variables of interest of the A-S profile were calculated through a custom-made script with
163 R statistical software (R v4.0.2, R Foundation for Statistical Computing) previously detailed by
164 Clavel et al. (2023) and based on the method presented by Morin et al. (2021). A_0 , S_0 and $(A-$
165 $S)_{\text{slope}}$ was determined per subject per week.

166

167 **Statistical Analyses**

168 All data (except $(A-S)_{\text{slope}}$ and $(F-V)_{\text{slope}}$ since these are negative values) were first log
169 transformed to reduce bias arising from non-uniformity error (Hopkins et al., 2009). However,
170 values presented in the text and figures are the back-transformed data and are presented as mean
171 $\pm$ SD. The quality of linear fitting of the F-V and A-S relationships was assessed with R^2 .

172 The concurrent validity was assessed with Bland-Altman method, mean bias (90% confidence
173 limits (CL)), the typical error of the estimate (TEE, 90% CL) both in percentage and
174 standardized units and Pearson correlation coefficients (90% CL). The magnitude of the
175 standardized mean bias, TEE and correlations were interpreted as proposed by Hopkins (2004).

176 The mean changes before and after the five weeks were evaluated in percentage. Paired samples
177 t test was used to analyzed variables changes. ES were calculated using Cohen's d. Threshold
178 values for assessing magnitudes of standardized effects were 0.20, 0.60, 1.20 and 2.00 for small,
179 moderate, large and very large, respectively (Hopkins et al., 2009). Pearson correlation and
180 covariance were calculated to establish the respective relationships between the changes of all
181 measures. P values of less than 0.05 were considered to be statistically significant. All statistical
182 analyses were performed using R on RStudio software (version 4.0.5).

183

184 **Results**

185 Data related to the concurrent validity analysis are displayed in Table 2. Limits of agreements
186 from the Bland-Altman analysis are reported in Figure 2. Pearson correlation revealed a large
187 relationship between F_0 and A_0 ($r = 0.55$ [0.38 – 0.69]) and a very large relationship between
188 V_0 and S_0 ($r = 0.83$ [0.74 – 0.89]).

189 Mean values, percentage changes from pre-post procedure and ES for all variables analyzed
190 are reported in Table 3. Individual changes from pre-post procedure between F-V and A-S
191 profile variables are reported in Figure 3. Differences in the changes from pre to post
192 procedure between F_0 and A_0 had very large and positive relationship ($r = 0.90$). Differences
193 in the changes from pre to post procedure between V_0 and S_0 had very large and positive
194 relationship ($r = 0.93$). Differences in the changes from pre to post procedure between $(F-$
195 $V)_{\text{slope}}$ and $(A-S)_{\text{slope}}$ had very large and positive relationship ($r = 0.98$).

196

197 *** Insert Table 2 ***

198 *** Insert Table 3 ***

199 *** Insert Figure 2 ***

200 *** Insert Figure 3 ***

201

202 **Discussion**

203 The main findings of this study showed moderate bias between F_0 and A_0 and $(F-V)_{\text{slope}}$ and $(A-$
204 $S)_{\text{slope}}$ with a good agreement between V_0 and S_0 , but a very large relationship in the evolution

205 of all variables between the F-V and the A-S profile. These findings are promising and could
206 open-up new possibilities in terms of monitoring neuromuscular qualities without additional
207 testing.

208 The results showed a moderate absolute bias (1.17 [0.97 to 1.36]) between F_0 and A_0 , which
209 shows an overall overestimation (16.10%) of maximal acceleration capacities with the A-S
210 profile approach. This overestimation can be explained by the fact that computing methods are
211 different. First, F-V profile is based on a mono-exponential model predictions whereas A-S is
212 based on raw velocity data and linear regressions. Then, the F-V profile variables assessed
213 through GPS (sampled at 10 Hz and including a double constellation system) used a speed
214 threshold of 0.3 m.s⁻¹ (Lacome et al., 2021; Clavel et al., 2022) to remove the chance of
215 identifying noise prior to sprint whereas the A-S profile considered points from a speed
216 threshold of 3 m.s⁻¹ (Morin et al., 2021; Clavel et al., 2023). In addition, the F-V and A-S
217 profiles differ in that one comes from the unique extreme of a 30 to 40-m linear sprint task
218 while the other is derived from multiple football situations. These situations include high-
219 intensity activities as very short to long linear to curve sprinting, changing of direction (COD)
220 or jumping (deceleration that equal negative acceleration is exclude in the *in-situ* concept)
221 (Barnes et al., 2014). These movements present similar mechanical demands, involving an
222 important acceleration phase. Then, the A_0 could encompass different physical abilities such as
223 explosive force or agility. Baena-Raya et al. (2021) studied the association between the F-V
224 profiles (horizontal and vertical), which provide an integrative mechanical representation of the
225 athlete's maximal capabilities in ballistic performance, and COD performance and found that
226 higher performance in both F-V profile parameters were significantly associated with lower
227 COD times. Recent research revealed a strong association between stronger and powerful
228 athletes and faster sprint as well as COD and higher jump performance (Nimphius et al., 2010;
229 Spiteri et al., 2015; Pereira et al., 2018). Loturco et al. (2019a) found similar results but also
230 that they may be less efficient at changing direction (isolated COD from COD deficit, Nimphius
231 et al., 2016), possibly due to difficulties in dealing with greater entry and exit velocities. Thus,
232 assessing A-S *in-situ* profile does not appear sufficient to determine precisely the athlete's
233 maximum horizontal force capabilities but only the athlete's maximum acceleration capabilities
234 which include force but encompass other qualities.

235 The results showed really good agreement between V_0 and S_0 (trivial bias: -0.10 [-0.23 to 0.02]).
236 The slight underestimation concerning the maximal speed capacities can be explained by the
237 fact that the A-S profile does not consider the amount of air friction, which can influence the

238 speed, especially at high speed (Smith & Johnson, 2018). Indeed, F-V profile can estimate air
239 friction over a single sprint while A-S profile cannot with pooled set of data. Moreover, the A-
240 S profile only consider positive acceleration, which can lead to ignore very high-speed points
241 during the maximal speed phases. Thus, assessing A-S *in-situ* profile appears sufficient to
242 determine the athlete's maximum speed capabilities.

243 The results showed a moderate absolute bias (-1.06 [-1.26 to -0.87]) between $(F-V)_{\text{slope}}$ and $(A-$
244 $S)_{\text{slope}}$. These results can be explained mathematically by both the overestimation of A_0 and the
245 slight underestimation of S_0 . Indeed, as $(A-S)_{\text{slope}} = -A_0/S_0$ and $(F-V)_{\text{slope}} = -F_0/V_0$, the slope of
246 the A-S profile would be steeper than F-V profile (visually the line is more vertical). The slope
247 F-V slope allow to compare the relative strengths and weaknesses in each player's profile with
248 the rest of the team and then programming the training content (Morin & Samozino, 2016).
249 Therefore from a practical point of view, practitioners should be careful and not transpose the
250 F-V profile to the A-S profile. More precisely do not compare $(A-S)_{\text{slope}}$ with $(F-V)_{\text{slope}}$ and not
251 to use them interchangeably.

252 After the 5 weeks of training intervention, F_0 and A_0 (Table 3) decreased respectively non-
253 significantly by 3.34% and -2.20% whereas V_0 and S_0 increased respectively non-
254 significantly by 3.46% and 3.61%. Moreover the slopes of F-V profile and A-S profile
255 respectively decreased by 5.79% and 5.10%. The variations showed very large correlation
256 (respectively $r = 0.90$, $r = 0.93$ and $r = 0.98$). These results indicates that despite the bias or not
257 at the origin, all the variables follow the same trend, very especially the slopes. Therefore, these
258 findings showed that the A-S profile could be used to monitor the change in sprint mechanical
259 output over time without testing.

260 **Limitations**

261 Further research with larger samples as well as different population (professional, men, another
262 team sport) is needed to confirm these findings. Then, GPS system used in the present study
263 and the sampling rate is different from Morin et al.'s (2021) proof-of-concept study and filtering
264 procedure leads to maximal acceleration at a speed lower than 3 m.s^{-1} . Considering both this
265 observation and young female subjects it would be interesting to gauge a speed threshold by
266 sprint capabilities or GPS providers. Since the A-S profile is a fairly young approach, further
267 studies should consider methodological considerations, especially regarding the speed
268 threshold.

269

270 **Practical applications**

271 - A_0 presented moderate error and a large relationship compared with F_0 . The theoretical
272 maximal acceleration encompasses other capacities and players need to perform a maximal
273 linear 30-m sprint to extrapolate the maximal horizontal theoretical force.

274 - S_0 presented trivial error and a very large relationship compared to V_0 . Practitioners can use
275 the A-S profile to extrapolate the maximal theoretical velocity.

276 - $(A-S)_{\text{slope}}$ presented moderate error and a moderate relationship compared to $(F-V)_{\text{slope}}$.
277 Practitioners need to assess F-V profile to provide insights into an athlete's neuromuscular
278 capabilities.

279 - A-S and F-V profiles variables showed very large correlation in the change. Practitioners can
280 use the A-S profile to monitor the change in sprint mechanical output over time in an invisible
281 way as long as a near-maximal and a sufficient range of raw points are included to provide
282 meaningful information related to A_0 and S_0 .

283

284 **Conclusions**

285 The present study demonstrates that, even though they have similar concepts, the A-S and F-V
286 profiles cannot be used interchangeably. F-V profile should be determined to characterize the
287 mechanical limits of the entire lower limb neuromuscular system to produce force, velocity and
288 power. However, the significance correlations between the evolution of the F-V and A-S
289 profiles' variables suggests that the A-S profile could be considered as a valid tool to monitor
290 the neuromuscular qualities in invisible ways in football. Future studies should consider the
291 possible application of this approach in other team sports (e.g., rugby or hockey) or any type of
292 intense running and sprint-based sport including maximal acceleration and speed.

293

294

295

296

297

298 **References**

- 299 Alonso-Callejo, A., García-Unanue, J., Perez-Guerra, A., Gomez, D., Sánchez-Sánchez, J.,
300 Gallardo, L., Oliva-Lozano, J. M., & Felipe, J. L., 2022. Effect of playing position and
301 microcycle days on the acceleration speed profile of elite football players. *Scientific*
302 *reports*, 12(1), 19266. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23790-w>
- 303 Barnes, C., Archer, D. T., Hogg, B., Bush, M., & Bradley, P. S. 2014. The evolution of physical
304 and technical performance parameters in the English premier league. *International Journal of*
305 *Sports Medicine*, 35(13), 1095–1100. doi:10.1055/s-0034-1375695
- 306 Clavel, P., Leduc, C., Morin, J. B., Owen, C., Samozino, P., Peeters, A., Buchheit, M., &
307 Lacome, M.; 2022. Concurrent Validity and Reliability of Sprinting Force-Velocity Profile
308 Assessed With GPS Devices in Elite Athletes. *International journal of sports physiology and*
309 *performance*, 17(10), 1527–1531. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2021-0339>
- 310 Hopkins, W. G., Hawley, J. A., & Burke, L. M., 1999. Design and analysis of research on sport
311 performance enhancement. *Medicine and science in sports and exercise*, 31(3), 472–485.
312 <https://doi.org/10.1097/00005768-199903000-00018>
- 313 Hopkins, W. G., 2004. How to interpret changes in an athletic performance test. *Sportscience*
314 8, 1–7
- 315 Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, Hanin J. Progressive statistics for studies in sports
316 medicine and exercise science. *Med Sci Sports Exerc.* 2009;41:3–13
- 317 Lacome, M., Owen, C., Peeters, A., Piscione, J., Lemeur, Y. & Leduc, C., 2020. Force velocity
318 profiling with GPS: is it reliable ? *Sport Performance & Science Reports*, 1(August):5-7.
- 319 Loturco, I., A Pereira, L., T Freitas, T., E Alcaraz, P., Zanetti, V., Bishop, C., & Jeffreys, I.
320 (2019). Maximum acceleration performance of professional soccer players in linear sprints: Is
321 there a direct connection with change-of-direction ability?. *PloS one*, 14(5), e0216806.
322 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216806>
- 323 López-Sagarra, A., Baena-Raya, A., Casimiro-Artés, M. Á., Granero-Gil, P., & Rodríguez-
324 Pérez, M. A., 2022. Seasonal Changes in the Acceleration–Speed Profile of Elite Soccer
325 Players: A Longitudinal Study. *Applied Sciences*, 12(24), 12987.
326 <https://doi.org/10.3390/app122412987>

327 Morin, J.B., Samozino, P., Murata, M., Cross, M.R., Nagahara, R., 2019. A simple method for
 328 computing sprint acceleration kinetics from running velocity data: Replication study with
 329 improved design. *J. Biomech.* 94, 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.07.020>.

330 Morin, J. B., Le Mat, Y., Osgnach, C., Barnabò, A., Pilati, A., Samozino, P., & di Prampero, P.
 331 E., 2021. Individual acceleration-speed profile in-situ: A proof of concept in professional
 332 football players. *Journal of biomechanics*, 123, 110524.
 333 <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110524>

334 Nagahara, R., Matsubayashi, T., Matsuo, A., Zushi, K., 2014. Kinematics of transition during
 335 human accelerated sprinting. *Biol. Open* 3, 689–699. <https://doi.org/10.1242/bio.20148284>.

336 Nimphius, S., Callaghan, S. J., Spiteri, T., & Lockie, R. G., 2016. Change of Direction Deficit:
 337 A More Isolated Measure of Change of Direction Performance Than Total 505 Time. *Journal*
 338 *of Strength and Conditioning Research*, 30, 3024–3032.
 339 <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001421>

340 Oliva-Lozano, J. M., Fortes, V., Krstrup, P., & Muyor, J. M., 2020. Acceleration and sprint profiles of professional male football players in
 341 relation to playing position. *PloS one*, 15(8), e0236959.
 342 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236959>

343 Samozino, P., Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Peyrot, N., Saez de Villarreal, E., & Morin,
 344 J. B., 2016. A simple method for measuring power, force, velocity properties, and mechanical
 345 effectiveness in sprint running. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 26(6),
 346 648–658. <https://doi.org/10.1111/sms.12490>

347 Smith, J., & Johnson, A., 2018. The effect of speed on air friction in fluid dynamics. *Journal of*
 348 *Fluid Mechanics*, 123(4), 567-589.

349

350

351

352

353

354

355

356

357 **Tables and figures**

358 Table 1: Characteristics of the endurance-strength program in the gym. The table is representing
 359 one lap of the circuit per week and the program includes 4 laps. Number of repetitions and
 360 respective load, time or height. RM, repetition maximum; BW, bodyweight; cm, centimeter;
 361 kg, kilogram.

362 Table 2: Concurrent validity analysis of the main mechanical variables. Data for F-V profile
 363 (F_0 , V_0 and $(F-V)_{\text{slope}}$) and A-S profile (A_0 , S_0 and $(A-S)_{\text{slope}}$) are presented as mean $\pm$ SD. Other
 364 concurrent validity statistics are presented with 90% confidence intervals. TEE, Typical error
 365 of Estimate; CV, coefficient of variation; F_0 , theoretical maximum force; V_0 , theoretical
 366 maximum velocity; A_0 , theoretical maximum acceleration; S_0 , theoretical maximum speed; F-
 367 V represent the best of the two F-V profiles respectively constructed from the two 30-m sprints;
 368 A-S represent the A-S profile in-situ constructed from the full week of training and game data;
 369 F-V profile, force-velocity profile; A-S, acceleration-speed *in-situ* profile

370 Table 3. Changes in F-V and A-S profiles variables from pre to post five weeks. CI, confidence
 371 interval; ES, effect size.

372

373 Figure 1. Schematic representation of the five weeks of the training plan designed by the
 374 technical et performance staff. Each week was made up of four pitch trainings, one game
 375 (except week 4), two gym sessions (except week 5) and one force-velocity training. Pitch
 376 sessions were a mixture of technical, physical and tactical drills.

377 Figure 2. Bland-Altman plot between the A-S profile variables and F-V profile variables,
 378 respectively A_0 vs F_0 and S_0 vs V_0 and $(A-S)_{\text{slope}}$ vs $(F-V)_{\text{slope}}$. Dash lines represent the limits of
 379 agreements.

380 Figure 3. Individual changes from pre to post intervention between F-V profile variables (F_0 ,
 381 V_0 and $(F-V)_{\text{slope}}$) and A-S profile variables profile (A_0 , S_0 and $(A-S)_{\text{slope}}$). Solid lines
 382 represent the mean $\pm$ SD for each variable. F_0 , theoretical maximum force (N.kg^{-1}); V_0 ,
 383 theoretical maximum velocity (m.s^{-1}); A_0 , theoretical maximum acceleration (m.s^{-2}); S_0 ,
 384 theoretical maximum speed (m.s^{-1}); SD, standard deviation

385

386

387 Table 1

Exercices	Week 1	Week 2	Week 3	Week 4	Week 5
Half squat	15 60% 1RM	12 65% 1RM	10 75% 1RM	8 80% 1RM	6 85% 1RM
Hip thrust	15 60% 1RM	12 65% 1RM	10 75% 1RM	8 80% 1RM	6 85% 1RM
Copenhagen	40 BW	50 BW	60 BW	30 BW + 10 % BW	40 BW + 10 % BW
Kettle swing	15 4 kg	12 8 kg	10 12 kg	8 16 kg	6 16 kg + elastic band
Box jump	12 60 cm	10 70 cm	8 75 cm	6 80 cm	4 85 cm
Nordic hamstring	6 BW	8 BW	4 BW + 10 % BW	6 BW + 10 % BW	8 BW + 10 % BW

388

389

390

391

392

393

394

395

396

397

398

399

400

401

402

403 Table 2

404

Validity	F_0 (N·kg ⁻¹) A_0 (m·s ⁻²)	V_0 (m·s ⁻¹) S_0 (m·s ⁻¹)	$(F-V)_{\text{slope}}$ $(A-S)_{\text{slope}}$
F-V	6.18 ± 0.78	8.30 ± 0.57	-0.75 ± 0.11
A-S	7.08 ± 0.62	8.24 ± 0.48	-0.86 ± 0.08
Standardised mean bias	1.17 (0.97 to 1.36)	-0.10 (-0.23 to 0.02)	-1.06 (-1.26 to -0.87)
Mean bias (%)	16.10 (13.25 to 19.02)	-0.68 (-1.52 to 0.16)	
Standardised TEE	1.58 (1.11 to 2.57)	0.69 (0.54 to 0.91)	1.78 (1.21 to 3.08)
TEE as CV (%)	11.52 (9.95 to 13.74)	3.98 (3.45 to 4.71)	
Pearson	0.53 (0.36 to 0.67)	0.82 (0.74 to 0.88)	0.49 (0.31 – 0.64)

405

406

407

408

409

410

411

412

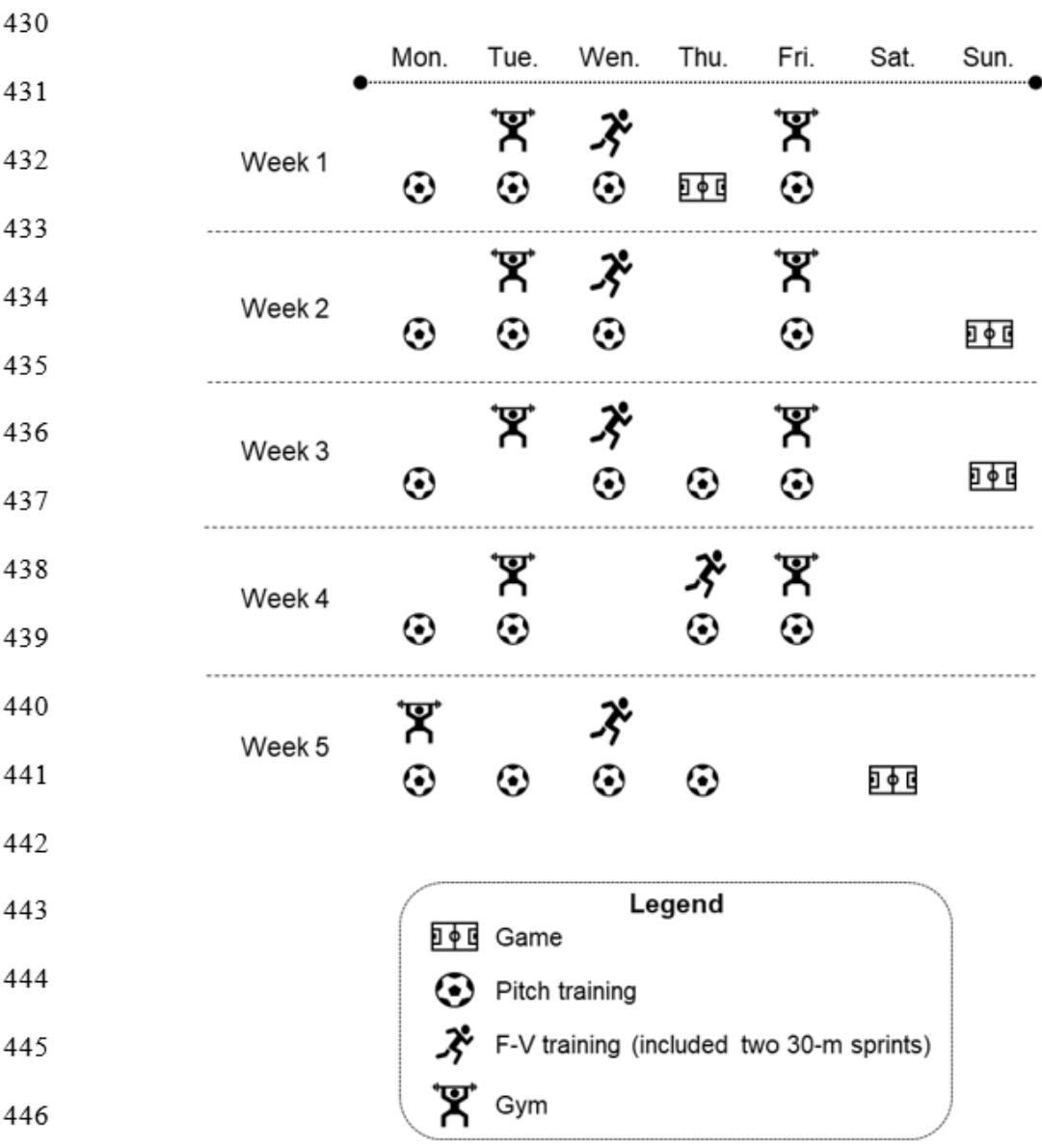
413

414

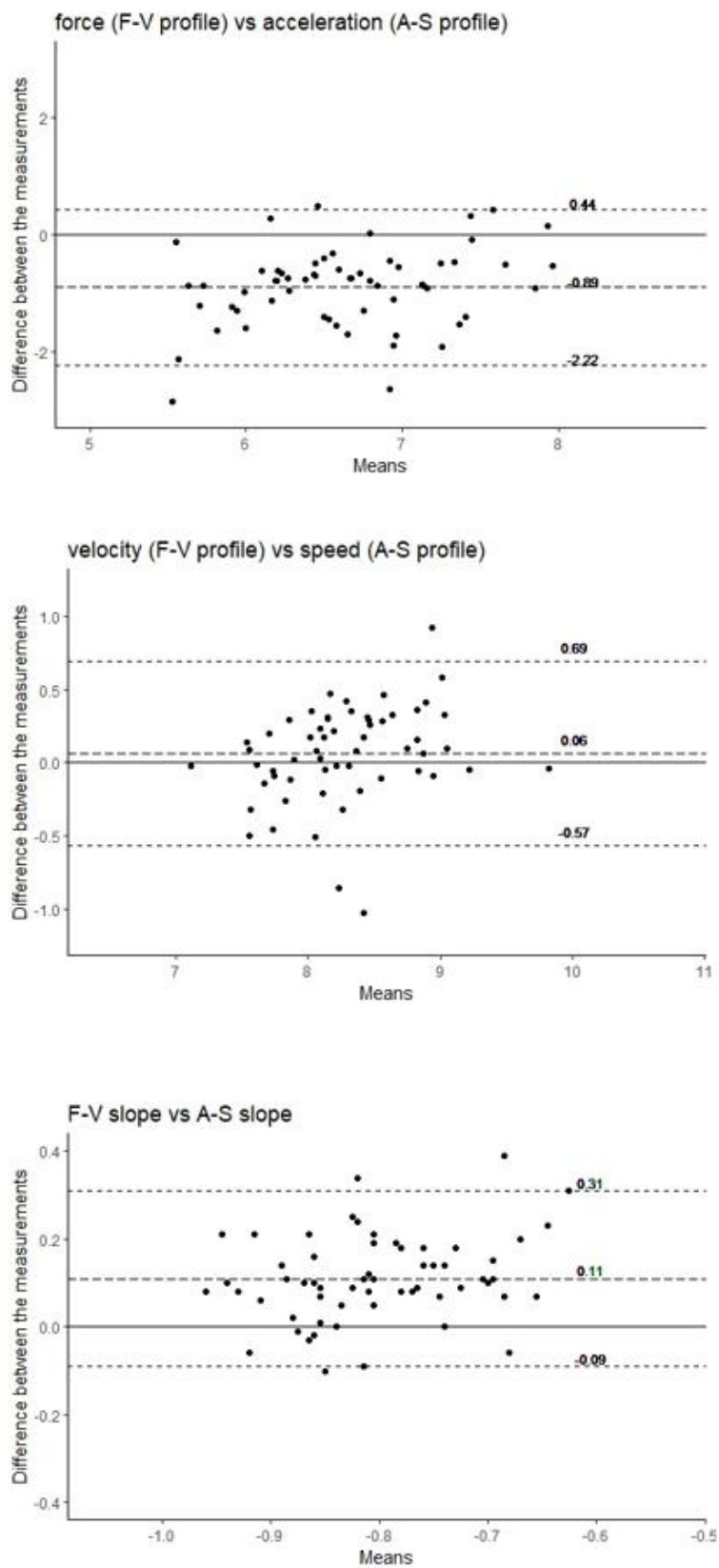
Table 3

		pre	post	mean difference (%) [90% CI]	P value	ES [90% CI]
F-V	F ₀ [N kg ⁻¹]	6.60 ± 0.66	6.39 ± 0.97	-3.34 [-9.55 to 3.14]	0.36	-0.34 [-0.37 to -0.28]
	V ₀ [m s ⁻¹]	8.39 ± 0.32	8.68 ± 0.52	3.46 [-0.30 to 7.16]	0.13	0.62 [0.54 to 0.64]
	F-V slope	-0.79 ± 0.07	-0.74 ± 0.11	-5.79	0.23	0.46 [0.40 to 0.49]
A-S	A ₀ [m s ⁻²]	7.44 ± 0.40	7.27 ± 0.58	-2.20 [-7.39 to 2.69]	0.41	-0.31 [-0.34 to -0.25]
	S ₀ [m s ⁻¹]	8.24 ± 0.31	8.54 ± 0.44	3.61 [0.24 to 6.80]	0.08	0.73 [0.65 to 0.75]
	A-S slope	-0.90 ± 0.06	-0.85 ± 0.09	-5.10	0.22	0.48 [0.41 to 0.51]

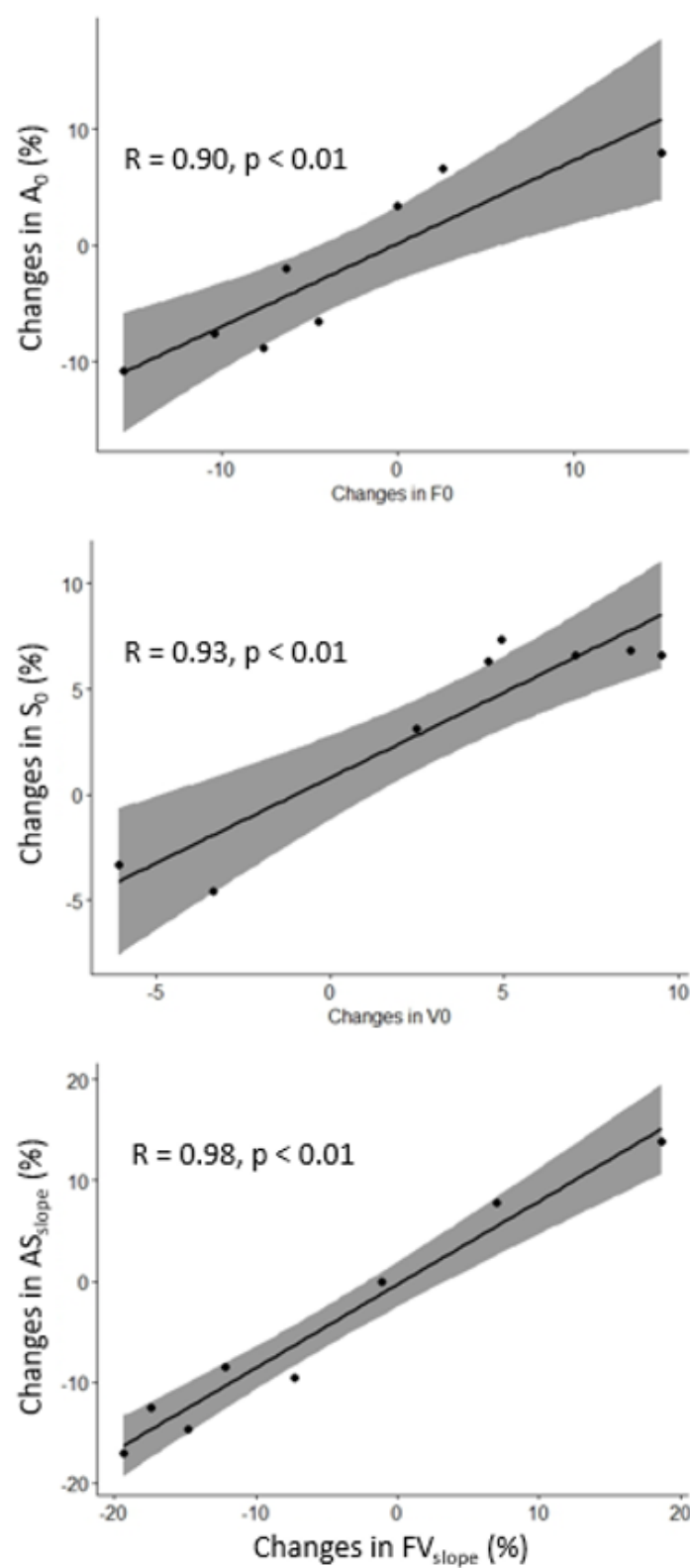
Figure 1



453 Figure 2



477 Figure 3



Evaluation des qualités neuromusculaires dans le football professionnel par l'utilisation des GPS : du profil force-vitesse horizontal vers l'accélération-vitesse in-situ

Résumé. L'analyse de l'activité football a montré, notamment par l'émergence des systèmes de positionnement par satellites (GPS), que le sprint est la principale action menant à des situations de buts et que les qualités neuromusculaires (vitesse, accélération) sont des facteurs clés pour la performance (Faude et coll., 2012 ; Haugen et coll., 2014). Une évaluation des qualités physiques en sprint est primordiale pour déterminer le potentiel de chaque joueur et individualiser l'entraînement. Le profil force-vitesse (F-v) en sprint décrit précisément les relations entre la force et la vitesse ainsi qu'entre la puissance et la vitesse (Samozino et coll., 2016). Bien que la méthode soit simple, puisqu'elle ne requiert que la collecte des données lors d'un sprint maximal linéaire de 30 mètres, plusieurs problématiques subsistent dans le football professionnel. L'évaluation nécessite un effort maximal qui est difficilement reproductible au vu des calendriers très congestionnés. De plus, la collecte des données nécessite du matériel spécifique (e.g., laser, radar, etc.) et le traitement des données peut devenir laborieux et chronophage pour l'évaluation régulière d'une équipe entière. Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse est d'évaluer si l'utilisation de l'outil GPS peut être une solution pour l'évaluation des qualités neuromusculaires dans le football professionnel. Dans une première étude, nous avons observé que le GPS est une alternative valide, reproductible, peu coûteuse et rapide par rapport au radar pour l'évaluation du profil F-v en sprint pour les joueurs élites. Dans une deuxième étude, nous avons analysé le nouveau concept de profil accélération-vitesse *in-situ* (A-S) dans le football (Morin et coll., 2021) et sa reproductibilité en fonction du nombre de séance incluses et de la présence de sprints standardisés. Nous avons mis en avant que le profil A-S est un modèle reproductible pour déterminer la relation entre l'accélération et la vitesse à partir des données GPS récoltées à l'entraînement. Afin d'extrapoler des valeurs significatives et reproductibles, il est nécessaire de recueillir un nombre de points suffisants qui englobent des valeurs proches maximales (90 à 95 %) d'accélérations et de vitesse. Dans la troisième étude, nous avons examiné la validité du profil A-S par rapport au profil F-v et l'évolution des variables des deux profils pendant un cycle de développement de cinq semaines. Nous avons mis en évidence que les deux modèles reflètent mécaniquement le même concept et qu'ils peuvent être utilisés pour décrire les mêmes qualités. Cependant, les différences observées rappellent que les méthodologies utilisées sont différentes et que les profils ne peuvent pas être utilisés de manière interchangeables. Néanmoins, la corrélation presque parfaite des évolutions des variables suggère que le profil A-S permet de suivre les qualités neuromusculaires de manière invisible. Ainsi une utilisation complémentaire des deux modèles semble judicieuse dans l'univers du football professionnel où les évaluations maximales sont difficiles à intégrer quotidiennement.

Mots clés : sport collectif, évaluation, membres inférieurs, qualités neuromusculaires, sprint