



Mémoire de MASTER 1

Entraînement et optimisation de la performance sportive

Parcours « Sport et performance de haut niveau »

Analyse Scientifique de la Performance

CARACTERISATION DE LA CHARGE MECANIQUE A
L'ENTRAINEMENT ET EN COMPETITION CHEZ DES JOUEURS
INTERNATIONAUX DE BADMINTON

Présenté par

Tachdjian Mathis

Directeur de recherche :

Dr. Hollville Enzo

Fédération Française de Badminton, pôle olympique

Année universitaire 2023-2024

Table des matières

Liste des tableaux	3
Liste des figures	4
Liste des abréviations	5
Introduction	6
I - Revue de la littérature	8
1 La caractérisation des demandes de compétition et d'entraînement dans le sport de haut niveau.....	8
1.1 Les intérêts de la caractérisation des demandes de l'activité sportive.....	8
1.1.1 Intérêts tactiques	8
1.1.2 Adapter l'entraînement aux exigences compétitives de façon individualisée et contextualisée.....	8
1.1.4 Le profilage <i>in-situ</i>	10
1.2 Les outils.....	10
1.2.1 L'analyse vidéographique par notation	10
1.2.2 Les outils de mesure de la position	11
1.2.3 Les accéléromètres et centrales inertielles	12
1.3 Les indicateurs de l'analyse des exigences physiques de l'entraînement et de la compétition	15
1.3.1 Temps effectif et densité d'effort	15
1.3.2 La distance	16
1.3.3 Indicateurs d'intensité	16
1.3.3 Les indicateurs construits.....	21
1.4 Le profilage in-situ	23
1.5 Scénarii les plus demandant	26
2 Caractérisation des exigences physiques du badminton	27
2.1 Aspects historiques et règlement	27
2.2 Analyse vidéographique notationnelle des demandes en Badminton de haut niveau	28
2.3 Caractérisation des exigences via les outils modernes dans le badminton.....	30
3 Problématique.....	30
II – Matériels et méthodes	32
1 Participants	32
2 Approche expérimentale de la problématique	32
3 Récoltes des données	33
4 Traitement de données	34

4.1	Filtrage des données	34
4.2	Classification et découpage des séquences et des sets en compétition.....	34
4.3	Indicateurs et profilage	35
5	Traitement statistique.....	36
III –	Résultats	37
IV –	Discussion	42
	Analyse des exigences physiques des différentes séquences	42
	Profilage des joueurs	45
	Limites	47
	Conclusion.....	47
	Références	49
	Annexes	70
	Abstract	74

Liste des tableaux

Tableau 1 : Analyse notationnelle des jeux olympiques de badminton de 2008 à 2016.....	28
Tableau 2 : Différences dans la structure temporelle des matchs compétitifs des Jeux Olympiques de 2016 et des championnats du monde de 2017 avec comme point de référence les hommes (gauche) et le double (droite).	29
Tableau 3 : Statistiques descriptives de la population de double étudiée	32
Tableau 4 : Statistiques descriptives de la population de simple étudiée.....	32
Tableau 5 : Description des différentes séquences investiguées dans l'étude	34
Tableau 6 : Nombre moyen de séquences observées par joueur	38
Tableau 7 : Intensité (AR/min) et paramètres du PAR des différentes séquences et des matchs compétitifs en fonction du sexe et de la spécialité chez des joueurs internationaux de badminton.....	38
Tableau 8 : Paramètres moyens des profils d'accélération record sur des sets de matchs officiels de joueurs internationaux de badminton	42

Liste des figures

Figure 1 : Exemple de l'influence du paramètre a et du paramètre b sur une courbe exponentielle inverse.....	24
Figure 2 : Le XSens Dot et son référentiel propre.....	32
Figure 3 : Intensité des différentes séquences selon l'AR. min^{-1} pour les simples hommes (A) et femmes (B).	38
Figure 4 : Intensité des différentes séquences selon l'Accel'Rate pour les doubles hommes (A) et femmes (B).....	39
Figure 5 : Profil d'accélération record moyen des différentes séquences de simples hommes.....	40
Figure 6 : Profil d'accélération record moyen des différentes séquences de doubles hommes.....	40
Figure 7 : Profil d'accélération record caractéristique de joueurs de badminton internationaux.	41

Liste des abréviations

AS : Accélération – vitesse

AVN : Analyse vidéographique notationnelle

GPS : Global Positioning System

LPS : Local Positioning System

ACM : Accéléromètre

PAR : Profil d'accélération record

CV : Coefficient of variation

IMU : Inertial Measurement Unit

HIIT : High Intensity Intermittent Training

PL : Player Load

AR : Accel'Rate

CF : Complementary Filter

VO_2 : Volume d'oxygène consommé

Introduction

Le badminton est un des sports les plus populaires au monde. Il a soulevé l'intérêt de la recherche en sciences du sport qui s'est principalement intéressée aux réponses physiologiques des joueurs et à l'analyse technique, tactique et temporelle du jeu. Le badminton se caractérise par des échanges de haute intensité, constitués de sauts, de fentes, et de changements de direction multiples afin de renvoyer un volant dans le camp adverse par le biais de coups variés dans de nombreuses positions (Phomsoupha & Laffaye, 2015). Les joueurs de badminton sont soumis lors des compétitions et des entraînements à de fortes exigences physiques, tant sur le plan physiologique que biomécanique. L'amélioration des performances des athlètes nécessite une compréhension fine des exigences physiques de l'activité sportive pratiquée afin de pouvoir proposer un entraînement adapté (Gabbett, 2016). L'entraînement a pour objectif d'imiter voire d'excéder les demandes compétitives dans le but de générer des adaptations physiques spécifiques. Ainsi, dans un objectif de gestion de la charge et d'adaptation de l'entraînement, il est primordial de pouvoir caractériser ces demandes physiques tant lors des entraînements qu'en compétition.

L'intérêt des staffs pour la caractérisation quotidienne et systématique des exigences physiques auxquelles sont soumis leurs joueurs n'a cessé de grandir (Dellaserra et al., 2014; Gómez-Carmona et al., 2020). L'évolution des outils technologiques de suivi de l'activité du sportif a ouvert la voie à une quantification écologique, non-invasive, peu chronophage et de moins en moins onéreuse. La littérature en sciences du sport portant sur la caractérisation des demandes sportives de compétition et d'entraînement a par conséquent gagné en quantité et en précision, ciblant particulièrement le football, le rugby, le football australien ou encore le basket-ball (Delaney, Cummins, et al., 2018; Malone et al., 2017). Le badminton n'a que peu été l'objet de ces études, ce qui peut s'expliquer par une professionnalisation plus tardive et des limitations technologiques liées à sa pratique en intérieur et à la particularité des mouvements des joueurs. Néanmoins, les méthodes de caractérisation des exigences compétitives développées dans les sports mentionnés semblent pouvoir s'adapter au badminton, puisqu'ils partagent leur nature intermittente.

Parmi les outils technologiques, l'accéléromètre offre la possibilité de s'affranchir des difficultés que pose le badminton. Son utilisation à des fins de caractérisation des exigences physiques a débuté au début des années 2010 et ne cesse de se développer (Boyd et al., 2011; Gómez-Carmona et al., 2020; Worsey et al., 2019). Cependant, son utilisation dans le

badminton est limitée dans la littérature à l'analyse biomécanique du mouvement et à la classification et quantification des coups (Shan et al., 2015; Tsai & Wen, 2022).

Considérant l'importance de la caractérisation des exigences physiques d'entraînement et de compétition du badminton au regard des contraintes auxquelles il soumet les sportifs, l'accéléromètre se présente comme une solution technologique prometteuse. Ce mémoire a pour objectif de caractériser les exigences physiques d'entraînement et de compétition en badminton de haut niveau afin de comparer différents types de séquences entre eux et aux demandes de compétition. Notre approche est basée sur l'étude des accélérations à partir de l'utilisation d'accéléromètres triaxiaux portés par les athlètes pendant 4 mois à l'entraînement et lors de compétitions internationales officielles. De plus, à l'image de ce qu'ont pu réaliser Pinot et Grappe par le passé en cyclisme (Profil de Puissance Record, 2011), nous proposons le Profil d'Accélération Record comme une méthode innovante d'analyse des exigences physiques des entraînements et des compétitions mais également de profilage des joueurs de badminton. L'objectif est d'offrir aux staffs une analyse approfondie des qualités de leurs athlètes et de leurs contenus d'entraînement.

I - Revue de la littérature

1 La caractérisation des demandes de compétition et d'entraînement dans le sport de haut niveau

1.1 Les intérêts de la caractérisation des demandes de l'activité sportive

1.1.1 Intérêts tactiques

La caractérisation de l'activité a pour objectif d'obtenir des informations sur la position du joueur, ses déplacements, les mouvements effectués, les vitesses atteintes, les accélérations, les décélérations ou encore les impacts. Toutes ces informations revêtent un intérêt tactique certain puisqu'elles offrent la possibilité d'investiguer l'activité physique d'un joueur comparativement aux autres joueurs de son poste selon l'adversité, le score ou encore le schéma tactique (Gray & Jenkins, 2010; Leite et al., 2014; Wisbey et al., 2010). Par exemple, Leite et al. ont montré en 2014 à l'aide des données issues d'un système local de suivi de la position (Local Positioning System, LPS) que le schéma défensif en basketball influence les demandes locomotrices des attaquants. Tojo et al. ont mis en évidence l'impact du temps effectif de jeu sur les aspects tactiques et techniques en football (Tojo et al., 2023). Gabbett et al. ont observé des différences dans les exigences de matchs entre les phases d'attaque et de défense en rugby à XV professionnel (Gabbett et al., 2014). Finalement, l'analyse des exigences de matchs au regard d'éléments offre aux entraîneurs et aux staffs la possibilité de connaître et d'anticiper l'impact physique des différents contextes tactiques.

1.1.2 Adapter l'entraînement aux exigences compétitives de façon individualisée et contextualisée

Les exigences de compétition diffèrent selon le sexe, le contexte compétitif, le poste en sport collectif, la spécialité (e.g. double et simple en badminton) ou encore la période du match. Ainsi, la caractérisation des demandes compétitives offre au regard de ces éléments contextuels des repères individualisés de volume et d'intensité basés sur les situations compétitives. Il est primordial que l'entraînement amène les joueurs à s'exposer aux scénarii les plus demandant

qu'ils rencontreront en match (Alonso et al., 2023; Colby et al., 2018). En disposant de repères objectifs et individuels, les staffs peuvent programmer (Gray & Jenkins, 2010) puis évaluer *a posteriori* l'impact de chaque entraînement au regard des objectifs visés (Alonso et al., 2023; Gabbett, 2016).

Toujours dans l'objectif d'adapter les entraînements aux demandes compétitives, certains auteurs se sont intéressés à l'analyse des exigences d'entraînement afin de les comparer à celles de match (Asín-Izquierdo et al., 2024; Gabbett et al., 2012; García et al., 2022; Miguens et al., 2024). Associer chaque type de séances (e.g. vitesse, matchs simulés, pliométrie, technique) aux exigences physiques auxquelles ils soumettent les joueurs offre une aide à la décision au staff quant à la programmation de l'entraînement (Alonso et al., 2023; Gabbett et al., 2014; Hogarth et al., 2016). En 2024, une étude sur les jeux réduits en football (Small Sided Games, SSG) à l'aide de système de positionnement mondial (Global Positioning System, GPS) a permis de caractériser les exigences physiques de chaque variante de ceux-ci afin d'aider les entraîneurs dans le choix d'exercice en fonction des exigences de compétition qu'ils souhaitent viser (Asín-Izquierdo et al., 2024). Gabbett et al. ont eux investigués en 2012 les demandes physiques de différents types d'entraînement (spécifique course, entraînement à répétitions de hautes intensités, spécifique rugby) comparativement à celle de compétition (Gabbett et al., 2012). Dans un article concernant le profil accélération-vitesse (AS) *in-situ* Miguens et al. proposent que la caractérisation des demandes physiques externes en temps réel pourrait même permettre aux staffs de modifier une séance en direct en cas de non atteinte des exigences de compétition (Miguens et al., 2024). Ainsi, l'étude des exigences de compétition et d'entraînement offre la possibilité aux staffs de pouvoir : 1) Disposer de valeurs de référence issues de la compétition décrivant les demandes physiques des joueurs ; 2) Programmer et adapter les entraînements en fonction des différentes sollicitations physiques qu'ils imposent aux joueurs.

De la même manière, la connaissance des exigences physiques de la compétition, en termes de volume, d'intensité moyenne et d'intensité maximale permet de construire des séances de rééducation amenant progressivement le joueur vers un retour à la compétition (Alonso et al., 2023; Coughlan et al., 2011). L'analyse des exigences au regard du poste, du sexe ou encore du niveau de jeu offre la possibilité d'individualiser les programmes pour chaque athlète (Eaton & George, 2006). De plus, l'exposition aux scénarii les plus demandant auxquels sont susceptibles d'être exposés les joueurs est primordiale dans la prévention des blessures (Colby et al., 2018) et donc la caractérisation de ceux-ci devient nécessaire.

1.1.4 Le profilage *in-situ*

L'analyse des demandes physiques maximales de compétitions sur plusieurs événements permet une analyse *in-situ* des capacités maximales de performance d'un joueur (Cardoso et al., 2024; Miguens et al., 2024; Pinot & Grappe, 2011; Roell et al., 2020). En effet, l'enjeu qui accompagne les compétitions officielles suggère que chaque joueur exprimera au moins une fois ses qualités physiques maximales afin de produire la performance nécessaire (Roell et al., 2020). Le profilage *in-situ* permet d'obtenir des données sur les qualités intrinsèques d'un joueur de façon plus écologique et non-invasive, et sans coût temporel (en opposition avec les tests physiques) (Miguens et al., 2024). En parallèle ou en substitution des tests physiques classiques, ce profilage *in-situ* pourrait permettre de classer les joueurs et d'attester des adaptations chroniques à l'entraînement (Miguens et al., 2024; Morin et al., 2021; Roell et al., 2020). De plus, le suivi de l'évolution de ces profils au cours d'une saison peut apporter de l'information supplémentaire quant aux effets aigus de l'entraînement dans un objectif de suivi de la charge et de gestion des pics de forme au regard des échéances (Morin et al., 2021).

1.2 Les outils

1.2.1 L'analyse vidéographique par notation

L'analyse vidéographique par notation manuelle (AVN) est la première méthode d'analyse de l'activité sportive (Fleureau, 2021). Les premières annotations de compétitions sportives sans enregistrements vidéographiques et donc en direct, remontent au 19^{ème} siècle où les journaux spécialisés proposaient des statistiques sur des matchs de tennis portant sur le nombre et les types de coups ainsi que le taux de réussite au service (Eaves, 2015). Depuis les années 70, ce type d'analyse est utilisé pour caractériser les demandes compétitives dans différents sports. L'AVN consiste à analyser un enregistrement vidéographique pour classer les événements selon plusieurs critères subjectifs comme la zone de jeu, la forme et l'intensité de déplacement, le type d'action (sauts, tirs, duels...) ou encore le temps effectif.

L'AVN présente deux problématiques majeures. Tout d'abord, elle est extrêmement chronophage ce qui la rend inadaptée à une analyse quotidienne et systématique des

entraînements et des compétitions. De plus, elle met en jeu la subjectivité de l'opérateur, limitant la répétabilité de la méthode (Carling et al., 2008; Duthie et al., 2003; Fleureau, 2021).

Les récents progrès des systèmes de caméra et de l'intelligence artificielle tendent à automatiser le processus d'analyse vidéographique afin de dépasser les problématiques précédemment évoquées. Seulement, ces méthodes sont encore en développement, particulièrement dans les sports aux moyens économiques plus modestes, et nécessitent du matériel encombrant (multiples caméras) (Ahmadi et al., 2015), qui ne sera pas forcément disponible sur les différents lieux de compétition.

1.2.2 Les outils de mesure de la position

L'arrivée des GPS dans les années 90 (Dellaserra et al., 2014) a ouvert la voie à une toute nouvelle perspective en sciences du sport concernant la mesure en temps réel de l'activité physique. A la connaissance de l'auteur, le premier chercheur à proposer l'utilisation du GPS pour analyser la locomotion humaine est Schutz à la fin du XX^e siècle (Schutz & Chambaz, 1997; Schutz & Herren, 2000). Depuis, le nombre de publications s'appuyant sur cette technologie pour caractériser les demandes sportives n'a cessé d'augmenter (Malone et al., 2017). Se présentant aujourd'hui sous la forme d'un petit boîtier solidement attaché à l'aide d'une brassière entre les scapulas des joueurs, le GPS permet une mesure peu invasive de la position instantanée à une fréquence généralement comprise entre 1 et 15 Hz pour ceux commercialisés pour le sport. Cette mesure est réalisée par triangulation en mesurant le temps que met le signal à parcourir la distance séparant l'émetteur des récepteurs, c'est-à-dire des satellites. De plus, il est possible de mesurer la vitesse de déplacement instantanée en mesurant le décalage de fréquence de l'onde entre son émission et sa réception (effet Doppler) (Fleureau, 2021), solution plus précise que la dérivation numérique des données de position par rapport au temps (Townshend et al., 2008). Un minimum de 4 récepteurs est nécessaire pour établir la mesure, et la qualité de celle-ci est dépendante de la qualité de l'échange de signal, que l'on mesure généralement via deux indicateurs : le nombre de satellites connectés et la dilution horizontale de précision (Malone et al., 2017).

Les nombreuses études portant sur la validité des GPS mettent en évidence une fiabilité acceptable (Scott et al., 2016) mais détériorée par l'augmentation de la vitesse et de la variation des déplacements, allant jusqu'à 15% d'erreur type de mesure (Malone et al., 2017). De plus,

les études sur la répétabilité inter-capteurs ont démontrés de fortes variations sur les données de position, particulièrement à vitesse élevée (Scott et al., 2016), nécessitant d'assigner chaque capteur à un joueur (Malone et al., 2017) pour toute la durée de l'étude.

Bien que présentant les avantages d'être peu-chronophage, valides dans la plupart des situations et peu invasive, l'utilisation du GPS dans le cadre de sport d'intérieur semble compromise. En effet, le signal GPS est quasi-inexistant au sein des bâtiment (Malone et al., 2017).

Les systèmes de positionnement local (Local Positioning System, LPS) permettent de pallier aux problématiques de qualité du signal GPS liées à la pratique de sport en salle et aux grandes infrastructures (e.g. stades). Leur fonctionnement repose sur le même principe que le GPS, consistant en une triangulation de la position de l'émetteur par l'échange d'un signal radio entre celui-ci et plusieurs récepteurs (antennes) placés autour du terrain (Pino-Ortega & Rico-González, 2021). Tout comme les GPS, les LPS sont capables d'obtenir la vitesse instantanée soit par différentiation des données de position ou par mesure de l'effet Doppler.

De façon générale, les LPS se sont révélés valides et répétables pour de nombreuses variables (position, distance et vitesse) (Fleureau, 2021; Fuchs et al., 2023; Gamble et al., 2023; Pino-Ortega & Rico-González, 2021; Rico-González et al., 2020). Les taux d'erreurs constatés sont généralement plus faible que pour les GPS (Gamble et al., 2023; Hoppe et al., 2018; Rico-González et al., 2020). Seulement, la fiabilité des LPS est faible pour les mesures de l'accélération et décélération instantanées. Fuchs et al. (2023) ont comparé un système LPS Kinexon à une technologie de motion capture, considérée comme gold standard en analyse du mouvement, dans leur capacité à mesurer les accélérations et décélérations maximales, et ont constaté un taux d'erreur de plus de 25%. Les étapes de dérivation nécessaires pour obtenir ces données d'accélération et l'application de filtres optimisés pour la mesure de la vitesse (Fuchs et al., 2023) semble expliquer ces résultats. De plus, les mesures des LPS comme des GPS sont compromises par les changements de direction soudains et les mouvements spécifiques aux différents sports (Rico-González et al., 2020).

1.2.3 Les accéléromètres et centrales inertielles

L'utilisation d'accéléromètres (ACM) pour analyser le mouvement humain a débuté dans les années 50 et depuis, son objectif principal est le suivi de l'activité physique journalière via son intégration à des montres où des smartphones (Evenson et al., 2022; Grouios et al., 2022; Yang

& Hsu, 2010). Les progrès technologiques liés au développement des systèmes micro-électromécaniques a permis une amélioration de la précision et de la fréquence d'échantillonnage des ACM ainsi qu'une réduction de leur prix et de leur taille (Evenson et al., 2022; Li et al., 2016; Wu et al., s. d.). Au regard de ces évolutions technologiques et de l'importance de l'analyse du mouvement humain dans la performance sportive, le Centre Australien de Recherche en Micro-Technologie lance en 2001 le projet « Technologie de Communication pour Suivre les Athlètes », dans l'objectif de proposer un capteur non intrusif permettant de récolter des données sur le mouvement des athlètes en temps réel (Wu et al., 2007). Depuis, le nombre de publications explorant les possibilités des accéléromètres dans le monde de la performance sportive n'a cessé d'augmenter, et leurs applications ainsi que les sports investigués se sont diversifiés (Chambers et al., 2015; Dellaserra et al., 2014; Gómez-Carmona et al., 2020; Preatoni et al., 2022; Rana & Mittal, 2021; Saponara, 2017).

Les ACM sont capables de détecter des mouvements selon un, deux ou trois axes et sont souvent associés avec un gyroscope, capable de mesurer des vitesses angulaires autour de ces trois axes, et à un magnétomètre qui mesurent les champs magnétiques, au sein d'un même boîtier, appelé centrales inertielles (Inertial Measurement Unit, IMU). Les données d'accélération captées par les ACM associées à celles recueillies par les autres capteurs ont servis à un vaste champ d'application dans l'analyse du mouvement sportif : analyse biomécanique du geste (Callaway, 2015; Ghattas & Jarvis, 2021; Hamidi Rad et al., 2021; Lambert et al., 2018; Rana & Mittal, 2021; Senington et al., 2020), détection des commotions cérébrales (Worsey et al., 2019), évaluation de la dépense énergétique (Evenson et al., 2022; Yang & Hsu, 2010), classification automatique de mouvements (Chambers et al., 2015b) ; rééducation et évaluation de la capacité à retourner à la pratique (Furman et al., 2013; Preatoni et al., 2022; Ren et al., 2023).

Les ACM sont également utilisés dans le cadre de l'analyse quotidienne et systématique des demandes physiques dans différents sports (Gómez-Carmona et al., 2020), principalement en étant associés avec les GPS/LPS. En effet la plupart des entreprises incluent avec leur GPS/LPS un IMU embarqué (e.g. Catapult Sport, Kinexon), contenant un accéléromètre. Ils permettent de mesurer l'accélération selon les trois axes du référentiel fixe du capteur avec une fréquence d'échantillonnage comprise entre 60 et 100 Hz, bien plus élevée que celle des systèmes de mesure de la position. La mesure directe de l'accélération triaxiale couplée à la fréquence d'échantillonnage permet de mesurer les impacts et les mouvements verticaux tels que les sauts. C'est pour cette raison qu'ils ont souvent été associés avec les GPS/LPS pour combler leurs limites.

Notons que les données issues de l'accéléromètre, du gyroscope et du magnétomètre offrent théoriquement la possibilité d'obtenir l'attitude et l'orientation du capteur par la technique de fusion de capteurs. Seulement, la mise en place de la fusion de capteurs se heurte à plusieurs limites. Tout d'abord, les données issues du magnétomètre, qui permettrait d'obtenir l'orientation du capteur sur le plan transversal en renseignant la position du nord magnétique se retrouve faussées en intérieur par les nombreux champs magnétiques (infrastructures métalliques, téléphones portables, système WiFi) (Segarra et al., 2019). Pour obtenir l'attitude du capteur, il est nécessaire de fusionner les données issues de l'accéléromètre et du gyroscope afin de corriger en temps réel les erreurs de mesures du premier dû aux rotations du référentiel et la dérive du dernier. Les deux filtres les plus étudiés sont le filtre de Kalman et le filtre complémentaire (CF) (Roell et al., 2019; Segarra et al., 2019). Bien que le CF ait montré des performances satisfaisantes dans sa capacité à différencier les accélérations verticales des accélérations horizontales (Roell et al., 2019), la mise en place de tels algorithmes présente un réel coût computationnel (Cudejko et al., 2022) et nécessite un calibrage peu compatible avec un suivi quotidien (Kerns et al., 2023). Bien que les récents progrès de l'intelligence artificielle tendent à réduire le coût computationnel des différents filtres nécessaires à la fusion de capteur (Cudejko et al., 2022) et que la recherche en navigation intérieure propose des solutions prometteuses pour corriger les données du magnétomètre (Kim et al., 2017), l'obtention de l'attitude complète du capteur est aujourd'hui toujours compromise (Roell et al., 2019). C'est pourquoi dans cette revue nous ne traiterons que le cas de l'accéléromètre isolé, en investiguant les possibilités qu'il offre.

De nombreuses études ont démontré que les accéléromètres possèdent une excellente répétabilité (coefficient de variation, $CV < 5,2 \%$) intra-capteurs dans des conditions de laboratoires (Boyd et al., 2011; Kelly et al., 2015; Nicoletta et al., 2018) et dans des conditions réelles (Boyd et al., 2011; Crang et al., 2021). La répétabilité inter-capteurs a aussi été considérée comme bonne à excellente ($CV < 10 \%$) dans des conditions contrôlées de laboratoire (Boyd et al., 2011; Nicoletta et al., 2018) et lors de gestes sportifs (Crang et al., 2021; Gómez-Carmona, Bastida-Castillo, et al., 2019; Janssen & Sachlikidis, 2010; Lambert et al., 2018; Raper et al., 2018).

La validité de la mesure est plus controversée. En effet, de nombreux auteurs ont relevé que les accéléromètres surestimaient les accélérations résultantes maximales comparativement au Gold Standard (Crang et al., 2021; Edwards et al., 2019; Roell et al., 2019), avec des valeurs de CV dépassant les 20%. Il a été supposé que la cause de cette surestimation serait liée aux

mouvements causés par l'élasticité de son moyen de fixation (e.g. brassière, short) (Edwards et al., 2019; Roell et al., 2019). Pour réduire l'impact de ces artefacts de mesure, un filtre passe-bas est préconisé, bien que la fréquence de coupure optimale est encore sujette à discussion (Edwards et al., 2019; Wundersitz, Gastin, Robertson, & Netto, 2015) mais semble se trouver entre 5 et 20 Hz (Crang et al., 2021; Roell et al., 2019, 2020; Wundersitz et al., 2013; Wundersitz, Gastin, Robertson, Davey, et al., 2015).

Pour conclure, bien que la validité des accéléromètres pour mesurer l'accélération maximale semble contestée, leur excellente répétabilité suggère que leur utilisation à des fins d'analyse des exigences de l'activité sportive est viable, puisque permettant de comparer et de contraster les mesures dans le temps et entre les joueurs. Les accéléromètres possèdent l'avantage d'être une solution peu invasive et utilisable sur tous les lieux d'entraînement et de compétition puisque ne nécessitant aucune structure externe (e.g. caméra, satellites, antennes). Ils sont capables de mesurer l'activité selon les trois axes du référentiel terrestre de façon écologique, et moins onéreuse que le LPS ou l'AVN (Kerns et al., 2023).

1.3 Les indicateurs de l'analyse des exigences physiques de l'entraînement et de la compétition

Les staffs sportifs utilisent de nombreux indicateurs afin d'analyser l'exigence physique de la compétition et des entraînements obtenus directement ou indirectement (étapes de calcul) à partir des outils mentionnés dans la partie 2.2. Ces indicateurs communiquent des informations concernant le volume d'activité, la répartition de ce volume selon les différentes intensités, et enfin sur les périodes les plus intenses de la compétition ou de l'entraînement, le tout de façon plus ou moins contextualisée au regard du sexe, du contexte compétitif (adversité, score, tactique...), du poste ou de la spécialité.

1.3.1 Temps effectif et densité d'effort

L'indicateur le plus ancien permettant d'analyser les exigences des entraînements et des compétitions est le temps effectif d'effort puisque estimable par l'AVN. Il consiste à séparer le temps de jeu des temps d'arrêt tels que les temps morts, les temps inter-échanges dans les sports de raquette, les arrêts de jeu causés par un fait de jeu (e.g. touches, fautes, lancers-francs) ou

encore les temps passés à l'écart de la zone de jeu. L'analyse du temps de jeu effectif a été réalisée dans de nombreux sport comme le football (Carling et al., 2008; Linke et al., 2018; Tojo et al., 2023), le rugby (Austin & Kelly, 2014; Deutsch et al., 2007; Duthie et al., 2005; T. King et al., 2009), le handball (Luig et al., 2008; L. Michalsik et al., 2012; L. B. Michalsik & Aagaard, 2015) ou encore le badminton (Abián et al., 2014; Chiminazzo et al., 2018; Phomsoupha & Laffaye, 2015).

A partir du temps effectif, il est possible de calculer le ratio entre le temps effectif et le temps total passé sur le terrain. Cet indicateur nous informe sur la densité d'effort (Abián-Vicén et al., 2018) et permet de programmer les séances d'entraînement intermittent à haute intensité au regard de ce ratio (Deutsch et al., 2007; King et al., 2009) afin de cibler les systèmes énergétiques de façon adéquate.

Ces analyses ont notamment permis de révéler des différences selon le sexe (L. B. Michalsik & Aagaard, 2015), la position (Austin & Kelly, 2014; Carling et al., 2008; Fleureau, 2021; Gray & Jenkins, 2010) ou encore la spécialité (double vs simple) en badminton (Phomsoupha & Laffaye, 2015).

1.3.2 La distance

Mesurable par AVN (Carling et al., 2008; Fleureau, 2021), par GPS (Malone et al., 2017) ou par LPS/GPS (Rico-González et al., 2020), la distance est aujourd'hui l'un des indicateurs les plus utilisés en science du sport, renseignant sur le volume absolu de travail locomoteur réalisé par les athlètes. Ces analyses ont par exemple permis de révéler des différences entre les matchs de simples et de doubles au tennis (Armstrong, 2023).

Notons qu'il n'est actuellement pas possible d'obtenir ni la distance ni la vitesse à l'aide d'IMU de façon valide et répétable, notamment à cause de la difficulté à estimer l'orientation du capteur relativement au référentiel terrestre (i.e. 1.2.3).

1.3.3 Indicateurs d'intensité

Au-delà du volume total d'activité, l'intensité à laquelle celui-ci est réalisé permet un niveau d'analyse plus fin de l'activité sportive. La capacité à effectuer des actions de haute intensité est décisive dans la plupart des sports (Delaney, Cummins, et al., 2018; Delves et al., 2021;

Edel et al., 2019; Haugen et al., 2014; Lockie et al., 2011; Phomsoupha & Laffaye, 2015; Young et al., 2022). En 2012, Faude et al. ont montré que 67% des buts en football étaient précédés d'une action à haute intensité (sprint, changement de direction, sauts) (Faude et al., 2012). De façon similaire, il a été montré en rugby et en football américain que lors des fins de matchs serrées, les accélérations étaient bien plus nombreuses, soulignant une nouvelle fois l'importance de ces efforts (Delves et al., 2021). Ces actions sont les plus coûteuses énergétiquement (Di Prampero et al., 2005; Ryan et al., 2018) et sont une source de dommages structuraux aux muscles et tendons (Delves et al., 2021). De plus, la grande majorité des blessures en sport survient lors de ces actions (Saito et al., 2023). Ainsi, afin d'évaluer de façon contextualisée les exigences de haute intensité de ces différents sports, tant dans un objectif d'entraînement que de prévention des blessures et de gestion de la charge, l'investigation d'indicateurs offrant la possibilité de décrire et de quantifier ces actions s'avère essentielle.

a) Vitesse

Le GPS/LPS et l'AVN offrent l'opportunité d'obtenir des informations concernant la vitesse de façon qualitative (e.g. marche, jogging, course, sprint) (Duthie et al., 2005), ou quantitative (Clemente et al., 2023; Townshend et al., 2008). La vitesse permet une analyse approfondie des exigences de compétition et d'entraînement en permettant d'investiguer l'intensité à laquelle l'athlète se déplace. A partir des données de vitesse instantanée obtenues les chercheurs se sont intéressés à : la vitesse moyenne ; la définition de seuil d'intensité de course (en km/h) afin d'établir le temps passé, la distance parcourue ou encore la quantité de courses réalisés dans chacune de ces zones d'intensités ; à la vitesse maximale atteinte (Fleureau, 2021; Galé-Ansodi et al., 2017; Malone et al., 2017; Ryan et al., 2018).

Ces différentes analyses utilisant des indicateurs issus des mesures (ou du calcul) de la vitesse instantanée offrent là aussi un regard contextualisé sur les exigences de hautes intensités auxquelles sont soumis les athlètes. En tennis, des différences de vitesse moyenne et maximale ont été observées selon l'issue du match (victoire ou défaite) (Kilit & Arslan, 2017), entre la compétition et l'entraînement (Galé-Ansodi et al., 2018) ou encore selon la spécialité (Armstrong, 2023). Il est primordial d'individualiser et de rendre spécifique l'entraînement en sprint et en répétition de sprint au regard du profil de l'athlète et des exigences de course correspondantes à son niveau compétitif, son sexe et sa position ou spécialité (Morin & Samozino, 2016).

b) Accélération

L'action d'accélérer l'ensemble du corps et celle de le maintenir à une certaine vitesse ne peuvent pas être considérées comme similaires. En effet, ces deux actions requièrent des qualités physiques différentes (Lockie et al., 2011; Sheppard & Young, 2006), ne possèdent pas le même coût énergétique (Di Prampero et al., 2005) et n'induisent pas les mêmes dégâts musculaires (Delves et al., 2021). De plus, les périodes les plus intenses d'accélération n'adviennent pas nécessairement au même moment que celles où la vitesse de déplacement est élevée (Delaney et al., 2018). La capacité à accélérer est primordiale dans de nombreuses actions décisives en sport (e.g. smasher en badminton, suivre les mouvements de son vis-à-vis sur les phases défensives en basketball, plaquer en rugby). Gaudino et al. ont démontré que la seule prise en compte des phases de courses sous-estime le coût énergétique d'un match chez des joueurs de football (Gaudino et al., 2013). Puisque l'analyse des demandes a su démontrer que la charge liée aux accélérations dépendait de nombreux éléments contextuels comme la tactique (Leite et al., 2014), le type d'entraînement (Hodgson et al., 2014; Miguens et al., 2024) ou encore le niveau (Johnston et al., 2019), au regard de l'impact structurel et énergétique des accélérations, l'intérêt des staffs et de la recherche pour leur quantification n'a cessé d'augmenter.

L'accélération est soit directement mesurée (ACM) ou dérivée de la position ou de la vitesse instantanée (GPS, LPS, AVN). De façon similaire à ce qui a été réalisé à partir des données de vitesse, les chercheurs s'intéressent à l'accélération moyenne selon différentes durées, au temps passé où à la distance parcourue à différents seuils d'accélération, à la quantification discrète des accélérations ou encore à l'accélération maximale (Delaney et al., 2018; Delves et al., 2021; Fleureau, 2021). De plus, afin de contextualiser plus précisément ces accélérations, certains chercheurs ont pris en compte la vitesse de l'athlète au départ de l'accélération (Reina et al., 2019).

En 2021, Delves et al. soulignent l'importance de différencier l'accélération positive de l'accélération négative (décélération) au regard des nombreux travaux sur leurs différences tant en termes de coût énergétique et de dégâts structuraux que d'occurrence et de qualités physiques requises.

Pour conclure, l'analyse des exigences liées aux accélérations et aux décélérations est importante étant donné les impacts de celles-ci sur l'athlète, leur survenue lors d'actions décisives et la variabilité de leur occurrence et de leur magnitude en fonction de différents

éléments contextuels. Elle permet la construction d'entraînements et de séances de réathlétisation individualisées et spécifiques, l'évaluation des joueurs et le suivi de la charge.

c) Considérations sur la définition des seuils d'intensité à partir des données de vitesse et d'accélération

La quantification des accélérations, des décélérations et des courses selon leur volume (temps ou distance) ou encore leur nombre se basent sur des seuils d'intensité. La définition de ces seuils a été le sujet de nombreuses discussions tant sur la manière que sur leur signification. Trois techniques ont été principalement utilisées pour définir ces seuils (Clemente et al., 2023) : définition arbitraire et non-individuelle, parfois à partir de données issues de matchs professionnels (Sweeting et al., 2017); de façon individualisée à partir de tests physiques et physiologiques, comme la vitesse maximale aérobie, la vitesse maximale de sprint (Díaz-Soto et al., 2023; Sweeting et al., 2017) ou la capacité maximale d'accélération (Núñez et al., 2018); de façon individualisée par des méthodes statistiques telles que le K-mean clustering (Ibáñez et al., 2022), le spectral clustering ou encore le modèle gaussien mixte (Park et al., 2019).

La définition arbitraire des seuils de vitesse et d'accélération est la plus utilisée puisque simple à mettre en place. Elle permet de comparer les joueurs entre eux et de contraster les données d'analyse de l'activité dans le temps même sur de longues périodes (lors desquelles les qualités du joueur évoluent). Seulement, en plus de n'avoir que peu de validité scientifique (Kavanagh & Carling, 2019; Park et al., 2019), ces seuils ne prennent pas en compte les qualités intrinsèques du joueur. Ils ne permettent donc pas d'investiguer de façon individuelle le réel effort fourni rendant ainsi complexe la gestion de la relation dose-réponse dans un contexte de suivi de charge (Clemente et al., 2023; Kavanagh & Carling, 2019). De plus, ces seuils varient selon l'entreprise fournissant la technologie (Clemente et al., 2023) et sont rarement différenciés selon le sexe (Sweeting et al., 2017).

Afin d'obtenir une représentation plus juste des demandes placées sur les joueurs, les staffs utilisent des valeurs individuelles issues de différents tests (40 m sprint, Yo-Yo intermittent-test, test incrémental en laboratoire) afin de construire ces seuils. Deux athlètes possédant la même vitesse maximale aérobie n'ont pas forcément la même vitesse de sprint maximale. Leur assigner les mêmes seuils soulèvent alors des questions. L'utilisation de la vitesse de réserve anaérobie est une des solutions proposées pour contourner ce problème, puisque construite à partir de la valeur de vitesse à volume d'oxygène consommé maximale ($VO_2 \text{ max}$) et celle de vitesse maximale de sprint. Néanmoins, la question se pose quant à la fréquence à laquelle ces

tests devraient être réalisés au regard de l'évolution des qualités anaérobies et aérobie des athlètes (Díaz-Soto et al., 2023).

L'utilisation des données de matchs et d'entraînement pour construire ces seuils à l'aide de méthodes statistiques et de machine learning permet de s'affranchir des tests physiques. Elle nécessite une grande quantité de données sur les valeurs de vitesse ou d'accélération de l'individu ou de la population dont on souhaite estimer les seuils d'intensité. Plusieurs problématiques ont été soulevées : la modélisation gaussienne mixte et le K-mean clustering supposent que chaque valeur discrète d'accélération ou de vitesse est dissociée des autres, ignorant ainsi la réalité de ce qu'est une course ou une accélération dans le sport et se retrouvent limitées par la faible densité de valeurs autour des hautes intensités d'action (Park et al., 2019). Le spectral clustering permettrait de contourner ce problème puisqu'il s'intéresse aux transitions d'une donnée à l'autre et ne nécessite pas de distribution particulière. En 2019, Park et al. ont utilisé cette méthode statistique afin de définir des seuils d'intensité de course chez une population de footballeuses. Certains auteurs (Kavanagh & Carling, 2019; Vescovi, 2019) ont émis des doutes quant à la validité de cette méthode, qu'ils illustrent notamment par la zone de « haute vitesse de course » ainsi estimée, s'étalant de 12,5 km/h à 19 km/h, en expliquant qu'il est difficile de concevoir qu'une course à 12,5 km/h puisse être dans la même classe d'effort qu'une course à 19 km/h.

La définition des seuils d'intensité est encore aujourd'hui source de nombreuses discussions dans le monde scientifique, et la plupart des chercheurs appuient la nécessité d'évaluer ces différentes méthodes au regard des réponses internes individuelles des athlètes (Kavanagh & Carling, 2019; Lovell et al., 2019; Park et al., 2019; Vescovi, 2019). Dans la conclusion de ce débat entre les trois groupes de chercheurs (Kavanagh & Carling, 2019; Park et al., 2019; Vescovi, 2019), Lovell et Park soulignent l'intérêt que pourrait avoir les staffs à utiliser des indicateurs génériques adaptées à leur population couplés à des seuils individualisés, l'un pour la comparaison inter-individuelle et l'évaluation des performances et l'autre dans un objectif de gestion de la charge (Lovell et al., 2019).

d) Quantifications discrètes des actions de haute intensité

Bien que l'accélération et la vitesse nous communiquent des informations sur l'intensité à laquelle les mouvements sont réalisés, la différenciation des différentes actions qui ont généré ces valeurs d'accélération ou de vitesse semble tout aussi importante. L'idée est alors de dissocier un saut d'un plaquage, une fente d'un smash ou encore un changement de direction

d'une accélération rectiligne. L'AVN permet déjà depuis longtemps cette quantification bien qu'extrêmement chronophage.

Une solution moins couteuse est l'utilisation d'IMU. Sa haute fréquence d'échantillonnage et sa sensibilité triaxiale ont permis de détecter avec une sensibilité supérieure à 98% les lancers en cricket (McNamara et al., 2015) ainsi que les sauts en volley-ball avec 95% de réussite (Villajero-Garcia et al., 2023). Certains chercheurs sont allés plus loin en associant les IMU positionnés sur le corps de l'athlète à des algorithmes de fusion de capteurs (e.g. extended Kalman filter, utilisé par XSens), d'analyse du signal (e.g. transformée de Fourier, transformée en ondelettes) et de machine learning (e.g. K-means clustering, classificateurs Bayésien, classificateurs RBF ou classificateurs par forêt aléatoire) (Ahmadi, 2014; Furman et al., 2013; Lentz-Nielsen et al., 2023; Pfeiffer et al., 2023). Ils ont ainsi été capables par exemple de différencier un coup portant d'un coup bloqué en boxe (Worsey et al., 2019). Seulement, les résultats sont parfois contestés lorsqu'un seul IMU est utilisé, puisque la capture de l'ensemble des mouvements segmentaires se retrouve limitée (Cust et al., 2019; Lentz-Nielsen et al., 2023). Un compromis est alors nécessaire entre précision et caractère invasif de la mesure, puisqu'un trop grand nombre de capteurs pourraient limiter l'athlète.

En plus de leur quantification, l'investigation de la durée de repos entre deux actions de haute intensité ou encore de la fréquence de leur survenue (en nombre par minute par exemple) offre un niveau d'analyse supérieur, notamment dans les sports intermittents (Fleureau, 2021).

1.3.3 Les indicateurs construits

a) Puissance métabolique

A partir des différentes variables décrites précédemment, les chercheurs, staffs et entreprises du monde du sport ont formulé des indicateurs plus poussés, à partir d'équations, afin d'ajouter des outils supplémentaires pour caractériser l'activité.

Les travaux de Di Prampero en 2005 sur l'estimation du coût énergétique de la course et de l'accélération à partir des données de vitesse issues d'une course sur un plan incliné ont ouvert la voie à l'idée d'une quantification du coût énergétique des activités sportives à partir des données de vitesse et d'accélération : la puissance métabolique. Cet indicateur revêt un intérêt tout particulier dans les sports à efforts intenses intermittents, où la seule prise en compte de la vitesse de courses ignore le coût énergétique élevé des nombreuses accélérations et

décélérations (Buchheit et al., 2015). Il a été montré que l'utilisation de la puissance métabolique permettait de refléter plus justement les réelles exigences des situations sportives constituées principalement d'accélération et de décélérations à vitesse relativement faible que l'unique prise en compte des vitesses de course (Buchheit et al., 2015; Gaudino et al., 2013). De plus, cet indicateur a montré une forte corrélation avec un test spécifique rugby permettant d'évaluer la capacité à répéter des efforts intenses (Smith et al., 2018), et la puissance métabolique moyenne en match de football gallois est fortement corrélée avec la VO_2 max des individus (Malone et al., 2021).

Seulement, la validité de cet indicateur pour estimer la dépense énergétique a été fortement remise en question. De nombreux travaux ont montré que la puissance métabolique sous-estime la dépense énergétique (Brown et al., 2016; Buchheit et al., 2015). Deux raisons majeures expliqueraient ces divergences (Brown et al., 2016; Buchheit et al., 2015; Osgnach et al., 2016). Tout d'abord, la validité du GPS pour mesurer l'accélération et la vitesse instantanées a été remise en causes, notamment pour des hautes valeurs de vitesse et d'accélération (Malone et al., 2017). De plus, le modèle original de Di Prampero qui est utilisé pour calculer la puissance métabolique : assume que la biomécanique du sprint sur un plan incliné est similaire à celle d'une accélération ; regroupe toute la masse du sprinteur en son centre de masse ; assume que la mécanique, et donc l'efficacité énergétique, lors des sprints, des accélérations et des décélérations est similaires entre les individus ; ne prend en compte ni les frottements de l'air, ni le cas des changements de direction ou des actions spécifiques au sport (e.g. coup en sport de raquette, conduite de balle, contacts).

La répétabilité de cet indicateur est faible ($CV\% > 60$) (Buchheit et al., 2015), ce qui suggère que la méthode actuelle de calcul de la puissance métabolique, ainsi que la fiabilité des outils de suivi de la position, nécessitent des améliorations supplémentaires avant d'être pouvoir utilisée avec confiance par les staffs (Brochhagen & Hoppe, 2022; Osgnach et al., 2016).

b) Les indicateurs liés aux données d'accélérations

Avec l'essor de l'utilisation des accéléromètres pour le suivi de l'activité des athlètes ont été introduits des indicateurs construits à partir de la cumulation des valeurs instantanées triaxiales. Le plus utilisé d'entre eux est le Player Load (PL) proposé par l'entreprise Catapult Sport, leader du marché (Gómez-Carmona et al., 2020), dont la formule est :

$$\sum \sqrt{\frac{(x_{t+1}-x_t)^2 + (y_{t+1}-y_t)^2 + (z_{t+1}-z_t)^2}{100}}.$$

L'arrivée sur le marché de nombreux fournisseurs d'accéléromètres a multiplié le nombre d'indicateurs, dont le principe de calcul est similaire,

ce qui limite la comparaison des résultats entre les différentes études. Gomez-Carmona a d'ailleurs montré en 2019 que ces indicateurs étaient fortement corrélés, et qu'il fournissait ainsi une information équivalente aux staffs quant à l'exigence locomotrice de l'activité de leurs athlètes (Gómez-Carmona, Pino-Ortega, et al., 2019).

Cependant, ces indicateurs ont été remis en cause (Bredt et al., 2020). Ces indicateurs sont calculés à partir de la variation d'accélération entre deux instants, indépendamment du temps que prend cette variation à se mettre en place. Ces variations d'accélération sont particulièrement élevées dans les mouvements tels que les sauts, les contacts ou les changements de direction. Seulement, ces indicateurs ne permettent pas de différencier deux actions aux valeurs d'accélération absolues différentes si les variations d'accélération sont identiques. De plus, ces indicateurs sont fortement corrélés à la distance parcourue (Boyd et al., 2011). Ainsi, il n'est pas possible de savoir à partir du simple indicateur si le joueur a effectué de nombreuses actions de haute intensité, où s'il a simplement parcouru une grande distance (Bredt et al., 2020). Enfin, la méthode de calcul de la plupart de ces indicateurs ne prend pas en compte les changements d'orientation du référentiel du capteur, générant alors des changements d'accélération fictifs. Hollville et al (2021) propose un nouvel indicateur qui permet de s'affranchir de cette problématique, l'Accel'Rate (AR) (Hollville et al., 2021).

Malgré les limites mentionnées ci-dessus, ces indicateurs ont été largement utilisés afin de caractériser les exigences dans de nombreux sports (Allard et al., 2022; Boyd et al., 2011; Gómez-Carmona et al., 2020; Pino-Ortega et al., 2019).

1.4 Le profilage in-situ

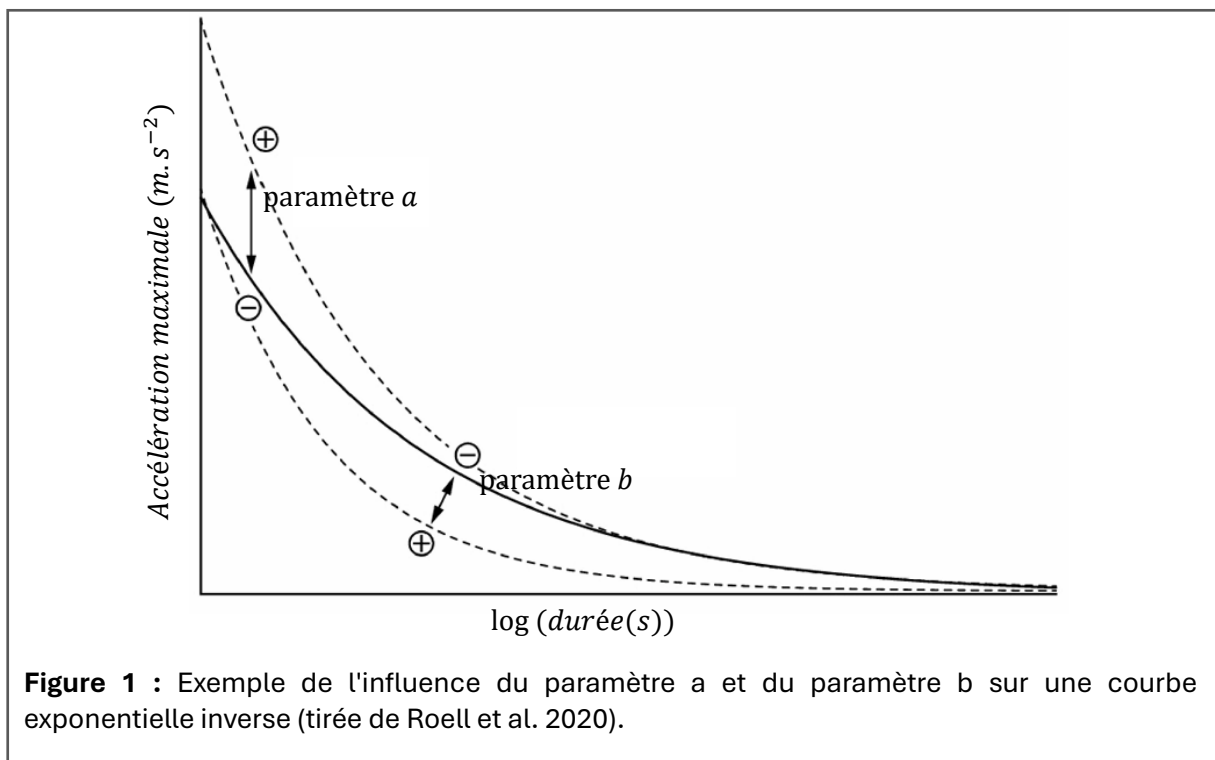
La mise en place d'une batterie de tests est courante dans les staffs. Elle permet d'évaluer les qualités des joueurs de façon plus ou moins spécifique afin d'adapter l'entraînement, de réaliser des sélections, de gérer la fatigue ou d'objectiver de potentielles adaptations positives suite à l'entraînement (Bishop et al., 2022; Gathercole et al., 2015; Morin & Samozino, 2016; Paterson et al., 2016). Toutefois, ces tests peuvent être chronophages, impliquent une certaine fatigue pour l'athlète et ne reflètent pas les réelles situations compétitives, ce qui pose des limites à leur utilisation, notamment dans le sport de haut niveau où la densité des compétitions ne cesse d'augmenter. L'arrivée des outils de suivi de l'activité de l'athlète a ouvert la voie au profilage

in-situ, en supposant que sur plusieurs matchs, les athlètes exposeront au moins une fois leur capacité maximale.

En 2011, Pinot introduit le « profil de puissance » record (Pinot & Grappe, 2011). Il consiste, à partir des données de puissance récoltées à l'aide de capteurs intégrés aux pédales sur les entraînements d'une équipe de cyclisme sur une année, à calculer la puissance moyenne maximale produite selon des fenêtres temporelles allant de 3 secondes à 60 minutes. Ensuite, pour chaque athlète, seule la valeur maximale observée sur l'année pour chaque fenêtre temporelle est conservée. A partir de ces données est modélisée la relation « puissance - durée de l'effort » à l'aide d'une fonction exponentielle décroissant de type a^{bx} . Ils ont ainsi montré que les paramètres a et b obtenus permettaient notamment de différencier les cyclistes selon leur spécialité (e.g. grimpeur ou sprinteur), laissant supposer que cette modélisation représente la « signature de l'athlète » (Pinot & Grappe, 2011). En suivant la même ligne directrice, Roecker et al. modélisent la relation « vitesse moyenne maximale – durée d'effort » par une fonction sigmoïde décroissante à deux paramètres, avec aucun biais ($r^2 > 0.999$), pour chacun des matchs de football investigués (Roecker et al., 2017). Cette fonction admet deux asymptotes. Les auteurs ont lié la plus haute des deux à la capacité maximale de sprint, et la plus basse à la vitesse critique. Ces deux paramètres ont permis de différencier les individus selon le sexe et le poste de jeu. Roecker et al. suggèrent alors qu'une telle modélisation permettrait d'évaluer *in-situ* les capacités de sprint maximale et serait liée à la vitesse critique. La vitesse critique représente la vitesse maximale pouvant être maintenue sans accumulation de métabolites et donc théoriquement indéfiniment. C'est un paramètre physiologique largement utilisé dans les sports d'endurance, puisqu'il délimite les domaines d'intensité lourd et sévère (Jones & Vanhatalo, 2017). Seulement, son estimation nécessite pour les athlètes de participer à une série de test d'efforts maximaux de différentes durées, ce qui peut être complexe pour des athlètes professionnels s'entraînant tous les jours. En 2020, Roell et al. modélisent la relation « accélération médiane maximale – durée d'effort » chez des joueurs de basketball à l'aide d'IMU (Roell et al., 2020) par une fonction exponentielle inverse à deux paramètres a et b (figure 1). Ils proposent que le paramètre a représente la capacité d'accélération maximale de l'athlète et que le paramètre b nous informe sur la capacité de l'athlète à répéter les efforts intenses sur de longues périodes. Dans cette étude, ces deux paramètres ont permis de classer les athlètes et de révéler des profils plus endurants et d'autres plus explosifs. Elle démontre

aussi que ces paramètres restent constants sur plusieurs matchs, ce qui suggère qu'ils caractérisent les qualités intrinsèques des joueurs.

Etant donné l'importance de la course et du sprint dans de nombreux sports, l'évaluation du profil force-vitesse en course est devenu courante dans de nombreux staffs. Ce profil permet ensuite d'individualiser l'entraînement afin de cibler les déterminants appropriés (Morin & Samozino, 2016). Toutefois, ces tests sont chronophages et génèrent de la fatigue, en plus de ne pas être réalisés en situation écologique. En 2021, Morin et al propose la réalisation d'un profil accélération-vitesse *in-situ* à partir des données GPS d'accélération et de vitesse. Le profil accélération-vitesse (Acceleration-Speed, AS) est proche du profil force-vitesse (Morin et al., 2021). En 2024, Miguens et al. montrent que ce profil AS, modélisé par une relation linéaire à



deux paramètres A_0 (accélération maximale théorique) et S_0 (vitesse maximale théorique) permet de distinguer les joueurs selon le poste de jeu. De plus, ils réalisent ce profil AS pour chaque entraînement et montre alors que les différents types de session ne génèrent pas les mêmes exigences en termes d'accélération et de vitesse maximales. L'évaluation systématique du profil AS permet alors de pouvoir évaluer les exigences de l'entraînement par rapport à celles du match et d'adapter les séances de façon individuelle. De plus, elle permettrait de contrôler la fatigue d'un individu (Miguens et al., 2024).

1.5 Scénarii les plus demandant

La plupart des études caractérisant les exigences physiques dans le sport rapportent des valeurs moyennes d'intensité (e.g. distance/min, vitesse moyenne, sauts/min). Cependant, les sports de nature intermittente sont caractérisés par des périodes de très hautes intensités entrecoupées de périodes à faible intensité. Ainsi, l'intensité moyenne sous-estime les réelles exigences maximales auxquelles les athlètes sont soumis (Calder et al., 2021; Gabbett et al., 2012; Johnston et al., 2019), avec des différences observées entre l'intensité moyenne sur un match et les périodes les plus intenses allant de 149% à 600% (Weaving et al., 2022). Par exemple, Calder (2021) a mis en évidence que bien que les joueurs de Lacrosse soient soumis à des exigences moyennes plus faibles que les joueurs de football, les périodes d'efforts maximaux sont supérieures en intensité à celles des footballeurs. Caractériser les exigences physiques en ne s'intéressant qu'aux valeurs moyennes ne permet pas de révéler les réelles exigences auxquelles sont soumis les athlètes. L'un des objectifs de l'entraînement et la finalité de la rééducation est d'exposer les athlètes aux demandes maximales auxquelles ils pourraient être contraints, tant en intensité qu'en volume. C'est pourquoi de nombreuses études se sont intéressées à ces scénarii les plus demandant selon plusieurs fenêtres temporelles. Une méthode largement utilisée est celle des moyennes ou médianes glissantes, puisque reconnue comme la plus efficace pour identifier les périodes d'exigences maximales, comparativement à la méthode de segmentation (Fox et al., 2021; Weaving et al., 2022). Elle consiste à effectuer, pour chaque fenêtre temporelle d'intérêt (allant généralement de 0,5 seconde à 10 minutes), une moyenne ou une médiane tout le long du signal (généralement « vitesse instantanée – temps » ou « accélération instantanée – temps ») puis de conserver la valeur la plus élevée (Delaney, Thornton, et al., 2018; Furlan et al., 2015; Roecker et al., 2017; Roell et al., 2020).

Différentes variables ont ainsi été investiguées, comme le Player Load, la distance, la distance au-dessus d'un certain seuil de vitesse (généralement 18 km/h), l'accélération et la vitesse moyenne (Roecker et al., 2017; Roell et al., 2020), ou encore le nombre d'actions de haute-intensité (e.g. sauts, accélérations, décélérations, sprints, impacts) (Alonso et al., 2023). Des différences ont ainsi été observées selon le niveau de jeu (Johnston et al., 2019), le poste de jeu (Alonso et al., 2023; Johnston et al., 2019) ou entre les entraînements et la compétition (García et al., 2022).

Toutefois, l'étude des scénarii les plus demandant doit être complétée par une investigation des réponses psycho-physiologiques de l'athlète afin de connaître les effets des entraînements et de

la compétition, tant en termes d'adaptation que de fatigue. Les scénarii les plus demandant montrent une certaine variabilité d'un événement compétitif à l'autre, et il semble alors nécessaire de s'intéresser au contexte d'apparition (e.g. période de la compétition, joueurs remplaçants ou titulaires, tactique) (Weaving et al., 2022).

2 Caractérisation des exigences physiques du badminton

2.1 Aspects historiques et règlement

Le badminton est un des sports les plus populaires du monde avec plus de 300 millions de joueurs en 2022 (Green et al., 2023) et est devenu olympique à l'occasion des jeux olympiques de Barcelone 1992. Dérivé d'un jeu antique chinois, le t'su-chü, c'est en Angleterre au 19^{ème} siècle que le jeu de badminton fut pour la première fois codifié (Guillain, 2002). Le badminton est particulièrement populaire en Asie (Phomsoupha & Laffaye, 2015), où il est le sport national de plusieurs pays.

Le badminton oppose deux joueurs ou deux paires, évoluant chacun d'un côté d'un terrain rectangulaire de 13,4 mètres de long et de 5,2 mètres de large, séparés par un filet de 1,55 mètres de haut. Les joueurs s'échangent un volant fait de plumes au-dessus du filet en le frappant avec une raquette. Ils marquent un point s'ils parviennent à faire tomber ce volant sur le sol de leur adversaire, ou si ce dernier ne parvient pas à leur renvoyer le volant dans leur terrain (<https://bwfbadminton.com>). Le système de comptage de points a évolué depuis sa première itération en 1893 par la Badminton Association of England. Si le badminton s'est toujours joué en 3 sets gagnants, il ne fallait à l'époque que 15 points (11 pour les femmes) pour remporter un set, et seul le serveur pouvait remporter un point. Depuis 2006, dans l'objectif de rendre le jeu plus spectaculaire et de réduire la durée des matchs, le système d'échanges (rallies en anglais) a été adopté (Ming et al., 2008). Ce nouveau système permet aux deux joueurs de marquer un point indépendamment du serveur. De plus, il faut à présent 21 points pour remporter un set.

2.2 Analyse vidéographique notationnelle des demandes en Badminton de haut niveau

Le badminton est le seul sport de raquette à se jouer avec un volant. De sa forme particulière née toute la spécificité du badminton. En effet, le volant peut atteindre des vitesses supérieures à $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ en sortie de raquette (King et al., 2020) et suit des trajectoires changeantes (e.g. dynamique d'envol affectée par la déformation de la jupe du volant ; effet Magnus (Collet, 2024)) ce qui impacte grandement les demandes physiques, techniques, tactiques, psychologiques et cognitives du badminton (Cohen et al., 2015). Ainsi, pour répondre à cette double contrainte de vitesse et de finesse, les joueurs effectuent de nombreux changements de direction, de sauts, de fentes dans plusieurs directions, ainsi que de mouvements de bras multiples et précis depuis des postures variées (Phomsoupha & Laffaye, 2015) ; sont capables de réagir rapidement via une utilisation optimale des informations visuelles et un traitement rapide de l'information (Phomsoupha & Laffaye, 2015).

Depuis 1996, plusieurs équipes de chercheurs se sont intéressées à la structure temporelle et à la quantification et classification des gestes effectués lors d'un match de badminton via l'AVN, du niveau amateur à élite (Liddle & Murphy, 1996; Phomsoupha & Laffaye, 2015), apportant ainsi une meilleure compréhension des demandes spécifiques du badminton. Cette description de l'activité est réalisée au travers de différentes variables telles que la durée de match ou la densité d'effort (Phomsoupha & Laffaye, 2015). Ces analyses ont permis de dégager les particularités de l'activité badminton au plus haut niveau mondial (tableau 1) (Abián et al., 2014; Abian-Vicen et al., 2013; Abián-Vicén et al., 2018; Arslanoglu et al., 2014; Chiminazzo et al., 2018; Gómez-Ruano et al., 2020; Laffaye et al., s. d.; Torres-Luque et al., 2019, 2020).

Tableau 1 : Analyse notationnelle des jeux olympiques de badminton de 2008 à 2016.

	Simple homme		Simple femme			Double homme			Double femme			Double mixte	
	2008	2012	2008	2012	2016	2008	2012	2016	2008	2012	2016	2012	2016
Durée de match (min)	40	45	28	38	42	44	48	58	47	42	54	44,3	47
Temps effectif (%)	28	28	31	ND	ND	18	20	15,8	27	24	23	ND	ND
Temps d'échange (s)	9	10,4	8	ND	7,87	5,3	7,3	6,4	10,2	7,7	9,6	ND	7,6
Temps de repos (s)	24,7	26,7	17,9	ND	22,1	21,4	26,5	30	25	21,7	28,6	ND	ND
Temps d'échange maximal (s)	ND	42,8	ND	34,6	36,9	ND	38,2	39,8	ND	48,2	53,6	23,2	33,7
Fréquence de coups	1,09	1,07	0,91	ND	1,01	1,54	1,48	1,54	1,27	1,29	1,33	ND	ND

Un match de badminton au plus haut niveau mondial dure en moyenne entre 40 minutes et 1 heure avec un temps de jeu effectif avoisinant les 30% en simple et se rapprochant des 20% en double (Chiminazzo et al., 2018; Laffaye et al., 2015; Phomsoupha & Laffaye, 2015; Torres-

Luque et al., 2019, 2020). Ce faible temps de jeu effectif s'explique par la durée de récupération près de deux fois supérieure à celle des échanges (tableau 1). L'analyse de la structure temporelle a aussi permis de révéler l'influence du sexe et de la spécialité sur les demandes de match. Le tableau 2 résume les différences constatées en fonction du type d'épreuve et du sexe lors des JO de 2016 et des championnats du monde de 2017 (Abián-Vicén et al., 2018; Chiminazzo et al., 2018; Gómez-Ruano et al., 2020; Iizuka et al., 2020; Torres-Luque et al., 2019, 2020). Les matchs des hommes sont plus longs, mais le ratio entre le temps d'effort et le temps de repos est plus faible, suggérant que les hommes prennent plus de temps pour récupérer entre les échanges et produisent des efforts plus intenses (dans l'absolu), caractérisés par une fréquence de coups plus élevée. Ces différences intersexes sont plus marquées en double. Indépendamment du sexe, le double présente une durée de match plus élevée, un temps effectif plus faible et une fréquence de coup plus élevée. Enfin, l'AVN des matchs élite de badminton a permis de mettre en évidence l'influence du niveau de compétition sur la demande. Lors des jeux de 2016, indépendamment du sexe et du type d'épreuve, la durée de match, la durée des échanges, et la fréquence de coups sont plus élevées dans les phases finales, et la part de temps effectif est plus faible (Abián-Vicén et al., 2018; Chiminazzo et al., 2018; Gómez-Ruano et al., 2020; Laffaye et al., 2015; Torres-Luque et al., 2019). Ce type d'analyse a aussi montré l'évolution du jeu au fil du temps et l'impact des changements de règle (Abián-Vicén et al., 2018; Green et al., 2023; Hoffmann & Vogt, 2024; Laffaye et al., 2015; Phomsoupha & Laffaye, 2015).

Tableau 2 : Différences dans la structure temporelle des matchs compétitifs des Jeux Olympiques de 2016 et des championnats du monde de 2017 avec comme point de référence les hommes (gauche) et le double (droite). ND : Pas de données

	Différences homme/femme (%)		Différences double/simple (%)	
	Simple	Double	Homme	Femme
Durée de match	-14	-7	-20	-28
Temps d'échange	+20	+33	+32	+21
Densité d'effort	+10	+31	+40	ND
Fréquence de tir	-8	-15	-40	-31

Ainsi, l'AVN des matchs de badminton de classe mondiale permet de caractériser depuis 1996 les demandes compétitives de haut niveau au regard d'éléments contextuels comme le sexe, le type d'épreuve, l'époque ou encore l'avancée dans le tournoi. Elle apporte une première compréhension des demandes compétitives de ce sport. Le double mixte est cependant un type d'épreuve dont les demandes compétitives de haut niveau sont sous-étudiées.

2.3 Caractérisation des exigences via les outils modernes dans le badminton

Dans la première partie de ce mémoire, nous avons mis en évidence les intérêts et les différentes applications des outils modernes de caractérisation des exigences physiques. En badminton, ces technologies n'ont été que très peu utilisées. A la connaissance de l'auteur seules 8 études ont utilisé soit un LPS, un GPS ou un accéléromètre pour investiguer les exigences physiques du badminton. Parmi ces 8 études, deux ne portent pas sur des joueurs de badminton mais sur des pratiquants d'autres sports ou des écoliers (Chen et al., 2022; Rojas-Valverde et al., 2021). 3 publications ont exploré le lien entre les indicateurs d'exigences physiques externes et les réponses internes chez des joueurs de badminton allant d'un niveau amateur (Fu et al., 2021) à international (Bisschoff et al., 2016; Edel et al., 2019) en utilisant des indicateurs moyennés sur l'ensemble du match ou des valeurs absolues. L'étude de Rojas-Valverde de 2020 investigate les exigences physiques de jeunes joueurs de niveau international à l'aide d'un LPS dans des matchs officiels (Rojas-Valverde et al., 2020). Enfin, Liu et al. quantifient les exigences physiques (via le Player Load) de différents types d'entraînement techniques à l'aide d'ACM positionnés sur différentes parties du corps. Il évalue ensuite la corrélation entre les valeurs de Player Load et les réponses internes des joueurs selon ces différents positionnements (Liu et al., 2024). Il en déduit ainsi que la position du capteur permettant la meilleure corrélation entre les données de l'ACM et la dépense énergétique est au niveau du sacrum.

3 Problématique

Dans cette revue de littérature, nous avons mis en évidence les intérêts de la caractérisation des exigences physiques de la compétition et des entraînements à des fins d'individualisation de l'entraînement et de rééducation, d'aide à la programmation de l'entraînement, de gestion de la charge ou de profilage. Les chercheurs, portés par les évolutions technologiques en matière de suivi de l'activité physique du sportif, ont investigué de nombreuses variables qui ont permis de contextualiser les exigences physiques au regard du sexe, d'éléments tactiques, du poste de jeu ou encore de l'adversité dans de nombreux sports, principalement le football, le rugby, le football australien ou encore le basketball, offrant ainsi aux staffs des outils d'analyse

supplémentaires. Dans le badminton, ce type d'étude n'a été que très peu réalisé chez des joueurs de badminton élite, et aucune d'entre-elles ne s'est intéressée au profilage *in-situ*, aux scénarii les plus demandant ou encore à la classification des différentes séquences d'entraînement au regard de l'intensité chez des joueurs de niveau international. Ce retard peut s'expliquer par les contraintes que pose le badminton. L'utilisation du GPS est compromise en intérieur. Le LPS offre l'opportunité de s'affranchir de cette problématique. Toutefois, les déplacements au badminton ne sont que très peu linéaires, sur des distances très courtes et avec une forte composante de mouvements verticaux (Phomsoupha & Laffaye, 2015), ce qui soulève des questions quant à la validité du système (i.e. 1.3.2). De plus, le LPS est une technologie onéreuse et qui nécessite que chaque lieu d'entraînement et de compétition en soit équipé. Enfin, le badminton est caractérisé par des déplacements sur de très courtes distances, majoritairement composés d'accélération, décélération, sauts, fentes et changements de direction. Ainsi, la mesure des données de position et de vitesse n'est que peu pertinente. La mesure directe des accélérations semble plus adaptée à la nature de ce sport. L'ACM est une solution technologique moins coûteuse, facilement transportable, mesurant directement l'accélération et dont la répétabilité satisfaisante a permis d'évaluer les exigences physiques dans de nombreux sports.

L'objectif de cette étude est double : 1) Classer les différents types d'entraînement régulièrement proposés par un staff de niveau international selon leur intensité relativement à celles observées en match, au regard de la spécialité et du sexe ; 2) Explorer la possibilité de réaliser un profilage *in-situ* des joueurs de badminton à l'aide d'une modélisation de la courbe « accélération – fenêtres temporelles ». Notre première hypothèse est que les différentes séquences d'entraînement peuvent être classées selon leur intensité moyenne. Notre deuxième hypothèse est que la courbe « accélération médiane maximale – fenêtre temporelle » peut se modéliser par une fonction exponentielle inverse à deux paramètres pour chaque joueur sur chaque type d'entraînement et chaque match. Les paramètres de cette fonction complètent les informations apportées par un indicateur d'intensité moyenne. Enfin, la modélisation exponentielle inverse de la courbe « accélération maximale – fenêtre temporelle » permettrait de classer les joueurs selon leur profil d'accélération record.

II – Matériels et méthodes

1 Participants

27 joueurs de badminton internationaux adultes (rang moyen = 77,6), dont 20 joueurs de doubles et 7 joueurs de simples ont participé à l'étude. Leurs caractéristiques sont résumées dans les tableaux 3 et 4. Les joueurs étaient familiarisés avec le port d'un accéléromètre en amont du début du protocole de récolte des données. Une fiche d'informations leur a été transmise avant le début de l'étude.

Tableau 3 : Statistiques descriptives de la population de double étudiée (n=20)

		Classement mondial	Âge (années)
Femme (n=8)	Moyenne	46,7 ± 28,5	23,6 ± 2,8
	Minimum	13	20
	Maximum	72	28
Homme (n=12)	Moyenne	93,2 ± 37,4	22,9 ± 4
	Minimum	13	19
	Maximum	134	30

Tableau 4 : Statistiques descriptives de la population de simple étudiée (n=7)

		Classement mondial	Âge (années)
Femme (n=3)	Moyenne	83 ± 52,2	25,3 ± 6,1
	Minimum	48	20
	Maximum	143	32
Homme (n=4)	Moyenne	81 ± 47,2	21,3 ± 2
	Minimum	39	19
	Maximum	133	24

2 Approche expérimentale de la problématique

Afin de caractériser les demandes de compétition et d'entraînement, un suivi longitudinal quotidien a été réalisé pendant 4 mois à l'aide des données issues d'un accéléromètre triaxial porté par chaque joueur.

3 Récoltes des données

La récolte des données mécaniques (accélération triaxiale) a été assurée par une IMU Xsens DOT (XS-DOT-SET-O2, Movella technologies, Enschede, Netherlands, 60 Hz). Le boîtier mesure 36,30 x 30,35 x 10,80 mm, pour un poids de 11,2 g. Le Xsens DOT possède la certification IP-68 assurant une étanchéité à la transpiration. Il embarque une batterie de 70 mAh ainsi qu'un espace de stockage de 64 MB permettant un fonctionnement autonome sur toute la durée des matchs et des entraînements. Le Xsens DOT embarque un accéléromètre enregistrant les accélérations ($m.s^{-2}$) en 3 dimensions selon le référentiel cartésien relatif au capteur $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ (figure 1), avec une fréquence de sortie de 60 Hz.



Figure 2 : Le Xsens Dot et son référentiel propre

L'acquisition est lancée et stoppée depuis l'application mobile Movella DOT fournie par l'entreprise. Le mode « recording (offline mode) » est sélectionné afin que le capteur puisse enregistrer les données localement et être alors déconnecté du mobile une fois l'acquisition lancée. Les données inertielles d'accélération brutes non-filtrées sont exportées ultérieurement via l'application Movella Data Exporter et stockées au format CSV jusqu'à leur traitement. Chaque joueur se voit assigné un seul et même capteur durant l'entièreté de l'étude. Le capteur est positionné solidement dans un boîtier en plastique afin de limiter les vibrations puis accroché au short, au niveau de la zone lombaire. Ce positionnement a montré la plus grande capacité à mesurer la cinématique du centre de masse ainsi qu'à estimer la dépense énergétique (Kerns et al., 2023; Liu et al., 2024). De plus, il permet de limiter la gêne pour les athlètes contrairement à d'autres zones classiquement utilisées comme la zone inter-scapulaire.

Les détails du déroulement des entraînements et des matchs (e.g. numéro de capteurs, chute de capteurs, heure de début de la séance, heures de début et de fin des séquences de travail, nom

des séquences de travail, zones de jeu privilégiées) étaient annotés dans un fichier Excel afin de faciliter l'interprétation des données lors de la phase de traitement et de récupérer les variables d'intérêt (e.g. sexe, type de séquence).

4 Traitement de données

Toutes les données ont été traitées à l'aide du langage Python (v.3.12) et de R (v.4.3.1).

4.1 Filtrage des données

Afin de réduire le bruit lié aux vibrations du capteurs dues à l'élasticité du système d'attache, un filtre passe-bas Butterworth de 4^{ème} ordre sans décalage de phase avec une fréquence de coupure de 8 Hz est appliqué. Ensuite, les données sont rééchantillonnées à 5 Hz pour une meilleure congruence entre les données de l'ACM et les mouvements du centre de masse (Roell et al., 2019; Winter, 2009).

4.2 Classification et découpage des séquences et des sets en compétition

Les séquences sont réparties en 9 catégories différentes : technique 2C2, 3C2, 2C1, 1C1, multidistribution et échauffement (tableau 5). Le début et la fin de chaque séquence sont estimés par combinaison de l'inspection manuelle du signal et des annotations de séance.

Tableau 5 : Description des différentes séquences investiguées dans l'étude

Spécialité	Nom de la séquence	Description
Simple	1C1	Confrontation en 1 contre 1. Peut se décliner en plusieurs variantes avec un focus sur une situation de jeu particulière. La collaboration y est faible.
	2C1	Confrontation en 2 contre 1. L'objectif est d'augmenter la pression temporelle du joueur isolé. Les périodes à 2 n'étaient pas différenciées des périodes à 1 dans l'étude.

	Technique	Phase sans confrontation avec collaboration complète, dans l'objectif de travailler un élément technique particulier. Est généralement réalisé sous forme de distribution de volants plutôt que d'échanges. Les gestes travaillés peuvent aller du très peu intense (service) au très intense (smash).
	Echauffement	Echauffement classique composé d'échanges de routine, de jeux et de courses à moyenne intensité.
	Match	Match en compétition officielle.
Double	2C1	Idem que pour les joueurs de simple.
	2C2	Idem que le 1C1 simple.
	3C2	Séquence utilisée généralement pour imiter la pression temporelle du 2C2 tout en permettant à tous les joueurs de jouer.
	Multidistribution	Consiste à une distribution de volants à haute fréquence sur des durées allant de 10 à 30 secondes afin d'imiter voire d'excéder les demandes de compétition. Est généralement constitué de 3 blocs de 4 à 6 répétitions selon plusieurs variantes techniques (e.g. smashes, jeu au filet, travail d'interception).
	Echauffement	Idem simple.
	Technique	Idem simple.
	Match	Idem simple.

4.3 Indicateurs et profilage

L'Accel'Rate (AR) est calculé à partir des données inertielles d'accélérations linéaires, puis exprimé par minute afin d'obtenir un indicateur de l'intensité moyenne, selon la formule proposée par Hollville et al. en 2021 :

$$AR = \left| \sqrt{x_{t+1}^2 + y_{t+1}^2 + z_{t+1}^2} - \sqrt{x_t^2 + y_t^2 + z_t^2} \right|$$

L'accélération résultante instantanée est calculée à partir des données instantanées d'accélération sur chacun des axes (x, y et z) du référentiel du capteur à l'aide de la formule suivante :

$$|acc_{res}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

Afin de construire le profil d'accélération record (PAR) issu de la courbe « accélération maximale record – fenêtre temporelle », une méthode de médiane glissante est utilisée, puisque plus robuste aux valeurs extrêmes que la moyenne. Pour chaque fenêtre temporelle Δt (correspondant à une position sur l'axe des abscisses de notre courbe) est associée une valeur y correspondant à la valeur maximale prise par une médiane glissante le long du signal « $|acc_{res}| - temps$ » d'une séquence d'entraînement ou d'un set de matchs officiels. Ce processus est répété pour toutes les fenêtres temporelles Δt souhaitées. Les fenêtres temporelles choisies s'étendent de 0,4 s (correspondant à un appui court au sol) à 600 s (correspondant à la moitié de la durée d'un set de badminton en compétition élite). Les valeurs en abscisse sont transformées par une fonction logarithme de base 10 afin de redimensionner les petites valeurs de fenêtres temporelles au regard de l'importance qu'elles portent dans la performance.

En se basant sur ces ensembles de points ainsi créés, une modélisation est réalisée par une fonction exponentielle inverse à deux paramètres a et b :

$$|acc_{res}|(\Delta t) = a \times e^{-b \times \log(\Delta t)}$$

Les paramètres a et b sont supposés communiquer des informations quant aux capacités intrinsèques de l'athlète (figure 1) (Pinot & Grappe, 2011; Roell et al., 2019). Le paramètre a , donnant la hauteur de la relation, communique ainsi la capacité d'un joueur à exprimer des valeurs d'accélération élevées sur des temps courts, qui peut être assimilé à un indice d'explosivité. Le paramètre b informe lui sur le taux de décroissance de la fonction exponentielle inverse, et représenterait ainsi la capacité de l'athlète à maintenir des valeurs d'accélérations haute malgré l'augmentation des durées d'effort.

Pour réaliser les profils des joueurs, le profil d'accélération record (PAR) sera réalisé en prenant les valeurs maximales relevées sur toutes les compétitions ou tous les entraînements pour chaque fenêtre temporelle. Pour caractériser les entraînements et la compétition, les valeurs moyennes pour chaque fenêtre temporelle sur l'ensemble des enregistrements seront utilisées.

5 Traitement statistique

Tous les résultats sont exprimés par la moyenne et l'écart-type (standard deviation, SD) et le seuil de significativité statistique a été défini à ($p = 0,05$). Le test de Shapiro-Wilk a révélé une distribution des données d'intensité et des paramètres des PAR non normales ($p < 0,05$). L'inspection visuelle de la distribution par un histogramme et un graphique quantile-quantile révèle une distribution gamma. Puisque des mesures répétées de tailles différentes sont réalisées

pour chaque groupe (sexe, spécialité, séquence), un modèle général linéaire à effets mixtes (GLMM) est utilisé avec le modèle adapté à la distribution des données et une fonction de lien logistique (logarithme népérien). Les effets fixes du modèle sont « type de séquence » et « sexe ». L'effet aléatoire considéré est le joueur. Afin de vérifier la pertinence de l'effet aléatoire, le modèle était comparé à un modèle linéaire général sans effet aléatoire (GLM). S'il n'y avait pas de différence significative entre les critères d'évaluation de ces modèles, le GLM était utilisé. Seul l'étude des intensités des séquences de simple a révélé une différence non-significative entre les deux modèles. La qualité de la modélisation du PAR est évaluée à l'aide du coefficient de détermination (r^2). La corrélation entre les paramètres du PAR est évaluée à l'aide du coefficient de Pearson. Les valeurs de r de 0,1, 0,3, 0,5, 0,7 et 0,9 étaient interprétées comme une corrélation faible, modérée, large, très large et extrêmement large (Hopkins et al., 2009).

Les paramètres des PAR des joueurs sont normalement distribués et le test de Levene montre une homogénéité des variances. Une analyse des variances (ANOVA) à deux facteurs est réalisée afin d'identifier des différences dans les paramètres du PAR selon la spécialité et le sexe. Le traitement statistique est réalisé à l'aide d'un script R personnel (v.4.3.1).

III – Résultats

Le tableau 6 offre une vue d'ensemble de la quantité de séquences qui ont pu être découpées sur les 4 mois de collecte. Afin d'assurer une puissance statistique satisfaisante, seules les séquences de match, technique, échauffement, 2C2, 2C1, 1C1, multidistribution et 3C2 chez les doubles et de match, 1C1, 2C1, technique et échauffement chez les simples ont été conservées. Sont exclus de l'analyse les joueurs n'ayant pas au minimum 2 observations pour chaque séquence investiguée. Ainsi, 7 joueurs ont été exclus de l'analyse chez les doubles (6 hommes et 1 femme).

L'ensemble des estimations du GLMM et du GLM est à retrouver dans le tableau 7. Le GLMM a révélé un impact significatif du sexe sur l'intensité, le paramètre a et le paramètre b pour toutes les séquences ($p < 0,01$).

Tableau 6 : Nombre moyen de séquences observées par joueur

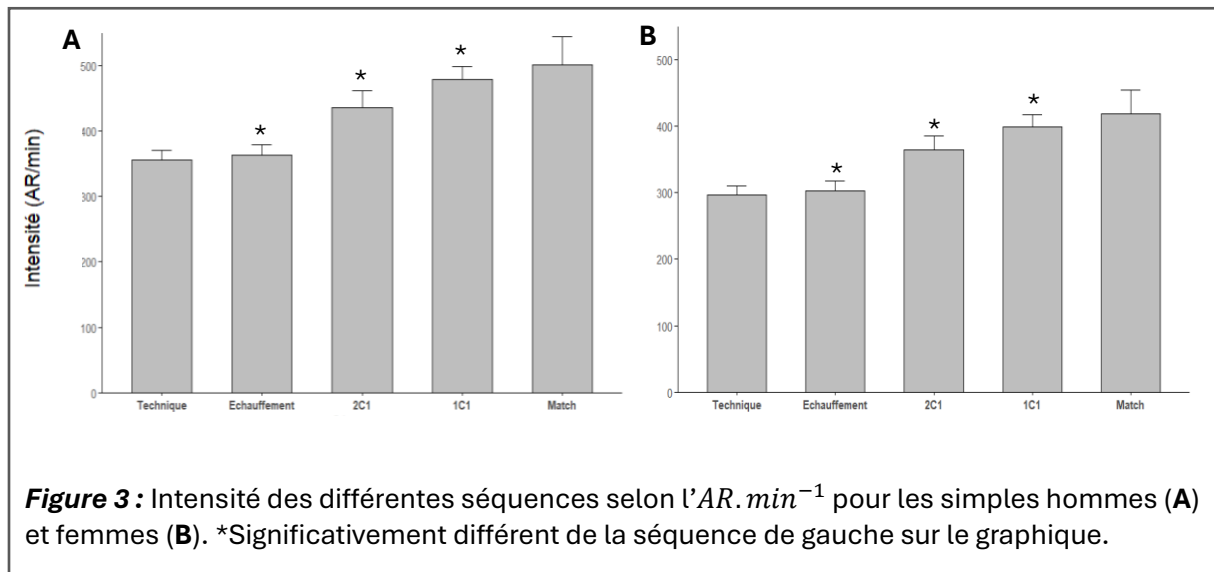
		Nombre moyen d'observations	
		Femme	Homme
Double (n=13)	Echauffement	22,3	28,5
	Technique	19,2	18,5
	2C1	14,8	13,8
	2C2	21,2	23
	3C2	11,5	15,5
	Multidistribution	3,8	5,5
	Match (set)	4,6	4,8
Simple (n=7)	Echauffement	12,7	11,5
	Technique	13,7	13,8
	1C1	9,3	9
	2C1	10,7	12,8
	Match (set)	4,4	4,5

Chez les simples, l'intensité moyenne est de $409,5 \pm 6,78 \text{ AR} \cdot \text{min}^{-1}$ pour les hommes contre $339,8 \pm 6,52 \text{ AR} \cdot \text{min}^{-1}$ pour les femmes. Il y a des différences significatives entre les séquences ($p < 0,05$) en termes de $\text{AR} \cdot \text{min}^{-1}$ (figure 3). Le match et le 1C1 présentent le $\text{AR} \cdot \text{min}^{-1}$ le plus élevé après le 2C1 et l'échauffement. La technique est la séquence avec le $\text{AR} \cdot \text{min}^{-1}$ le moins élevé.

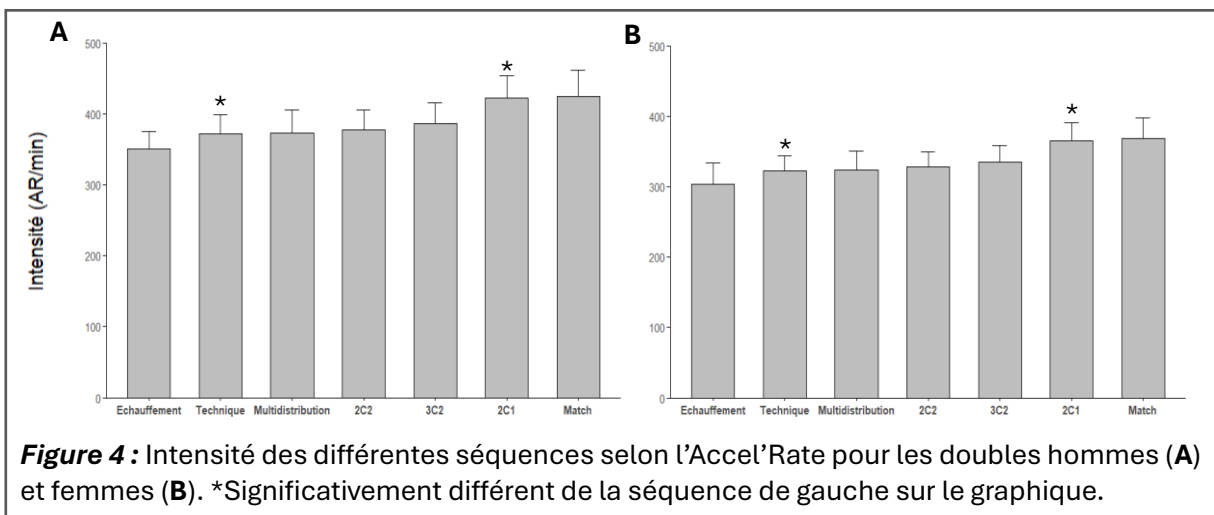
Tableau 7 : Intensité (AR/min) et paramètres Du PAR des différentes séquences et des matchs compétitifs en fonction du sexe et de la spécialité chez des joueurs internationaux de badminton

		Femmes		Hommes	
		Intensité ($\text{UA} \cdot \text{min}^{-1}$)		Intensité ($\text{UA} \cdot \text{min}^{-1}$)	
		a	b	a	b
Joueurs de double (n=13)					
Echauffement	$304,0 \pm 15,21^*$	$11,09 \pm 0,32^*$	$0,257 \pm 0,01^{C,F,G}$	$350,7 \pm 12,77^*$	$0,281 \pm 0,01^{C,F,G}$
Technique	$322,2 \pm 10,91^{A,C,E}$	$11,45 \pm 0,33^{A,B,D,E,G}$	$0,242 \pm 0,01^*$	$371,7 \pm 13,83^{A,C,E}$	$0,264 \pm 0,01^*$
2C1	$365,6 \pm 12,78^{B,D,E,F,G}$	$11,55 \pm 0,34^{A,B,D,E,G}$	$0,224 \pm 0,01^*$	$421,8 \pm 16,10^{B,D,E,F,G}$	$0,244 \pm 0,01^*$
2C2	$327,6 \pm 10,97^{A,C,E}$	$12,73 \pm 0,37^{A,B,C,E,F}$	$0,268 \pm 0,01^{C,D,E,F}$	$377,9 \pm 13,94^{A,C,E}$	$0,293 \pm 0,01^{C,D,E,F}$
3C2	$335,4 \pm 11,71^{A,C,E}$	$12,66 \pm 0,38^{A,B,C,E,F}$	$0,255 \pm 0,01^{C,F,G}$	$386,9 \pm 14,73^{A,C,E}$	$0,279 \pm 0,01^{C,F,G}$
Match	$368,0 \pm 15,21^{B,D,E,F,G}$	$13,58 \pm 0,46^*$	$0,259 \pm 0,01^{C,F}$	$424,6 \pm 19,04^{B,D,E,F,G}$	$0,283 \pm 0,01^{C,F}$
Multidistribution	$323,8 \pm 13,67^{A,C,E}$	$14,93 \pm 0,51^*$	$0,258 \pm 0,01^{C,F}$	$373,5 \pm 16,59^{A,C,E}$	$0,282 \pm 0,01^{C,F}$
Joueurs de simple (n=7)					
Echauffement	$302,8 \pm 7,47^{*,\beta,\delta}$	$10,92 \pm 0,27^{*,\beta,\delta}$	$0,265 \pm 0,01^{*,\Delta,\delta}$	$362,9 \pm 8,63^{*,\beta,\delta}$	$0,261 \pm 0,01^{*,\Delta,\delta}$
Technique	$296,8 \pm 7,04^{*,\beta,\delta}$	$11,10 \pm 0,27^{*,\beta,\delta}$	$0,248 \pm 0,01^{\beta,\alpha}$	$355,8 \pm 7,92^{*,\beta,\delta}$	$0,245 \pm 0,01^{\beta,\alpha}$
1C1	$399,6 \pm 11,04^{*,\Delta}$	$13,07 \pm 0,29^{**}$	$0,248 \pm 0,01^{\beta,\alpha}$	$479,0 \pm 12,75^{*,\Delta,\delta}$	$0,245 \pm 0,01^{\beta,\alpha}$
2C1	$364,4 \pm 9,30^{**}$	$12,49 \pm 0,28^{**}$	$0,241 \pm 0,01^{\beta,\alpha}$	$436,8 \pm 10,19^{**}$	$0,238 \pm 0,01^{\beta,\alpha}$
Match	$418,6 \pm 18,41^{*,\Delta,\delta}$	$14,24 \pm 0,38^{**}$	$0,268 \pm 0,01^{*,\Delta,\delta}$	$501,8 \pm 21,82^{*,\Delta,\delta}$	$0,265 \pm 0,01^{*,\Delta,\delta}$

Les résultats sont présentés en valeur moyenne $\pm$ erreur standard d'estimation. **Double :** ^A Différences significatives avec "Match"; ^B Différences significatives avec "Multidistribution"; ^C Différences significatives avec "2C1"; ^D Différences significatives avec "3C2"; ^E Différences significatives avec "Echauffement"; ^F Différences significatives avec "Technique"; ^G Différences significatives avec "2C2"; * Différences significatives avec toutes les autres séquences. **Simple :** ^{*} Différences significatives "2C1"; [†] Différences significatives avec "Match"; [‡] Différences significatives avec "1C1"; [§] Différences significatives avec "Technique"; ^{||} Différences significatives avec "Echauffement"; ^{**} Différences significatives avec toutes les autres séquences.



Chez les doubles, l'intensité moyenne est de $376,8 \pm 14,10 AR.min^{-1}$ pour les hommes contre $330,5 \pm 11,15 AR.min^{-1}$ pour les femmes. Il y a des différences significatives entre les séquences pour les deux sexes ($p < 0,05$) en termes de $AR.min^{-1}$ (figure 4). Le match et le 2C1 présente le $AR.min^{-1}$ le plus élevé suivi du 3C2, 2C2, Multidistribution et Technique, entre lesquelles il n'y a pas de différences significatives. Enfin, l'échauffement présente le $AR.min^{-1}$ le moins élevé.



Chaque séquence pour chaque joueur a pu être modélisée par une fonction exponentielle inverse à deux paramètres a et b ($r^2 = 0,97 \pm 0,02$). En réalisant la moyenne de ces paramètres pour chaque type de séquence, par spécialité et par sexe, il est possible de modéliser le PAR pour chaque séquence (figure 5 et 6).

Là où le $AR.min^{-1}$ du match n'était pas significativement différent du 1C1 chez les simples, le paramètre a du PAR entre ces deux séquences est significativement différent ($p < 0,01$), indiquant que sur les courtes durées, les exigences physiques maximales du match sont plus élevées que celle du 1C1 d'entraînement.

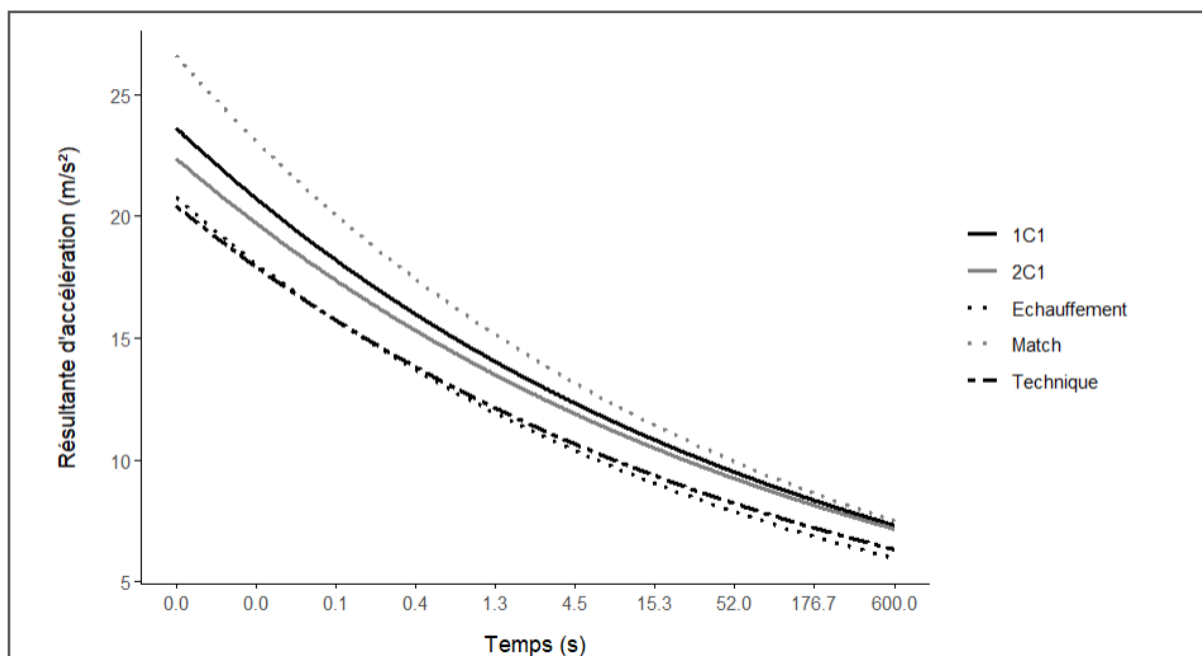


Figure 5 : Profil d'accélération record moyen des différentes séquences de simples hommes.

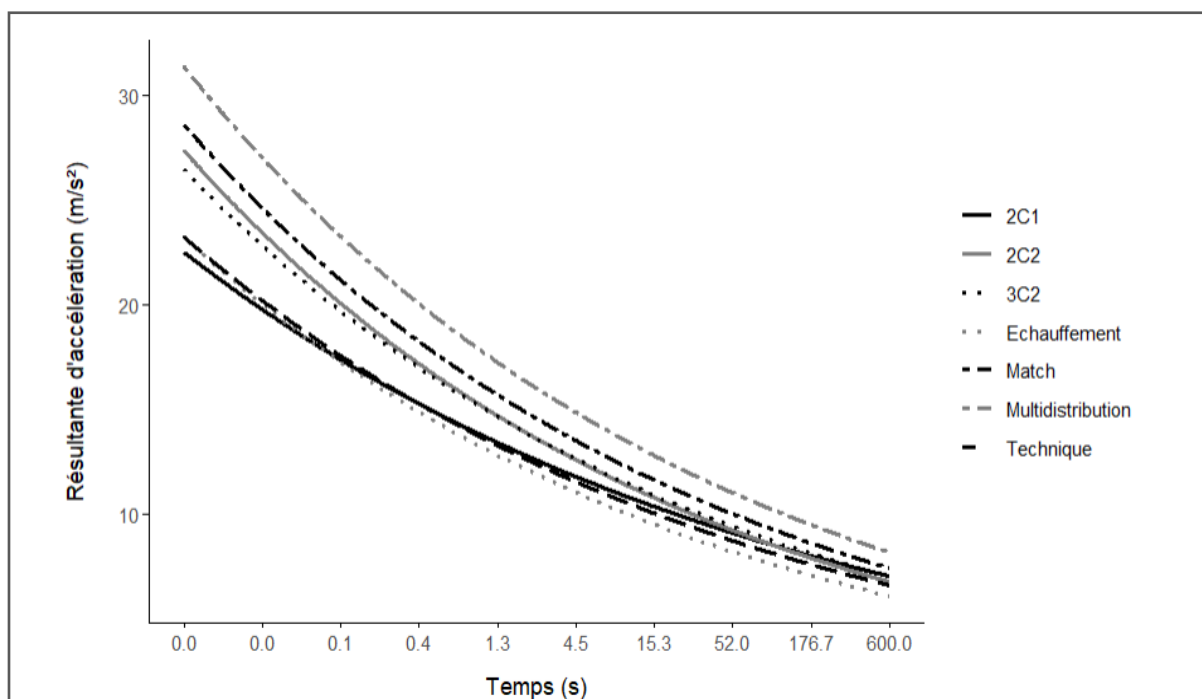
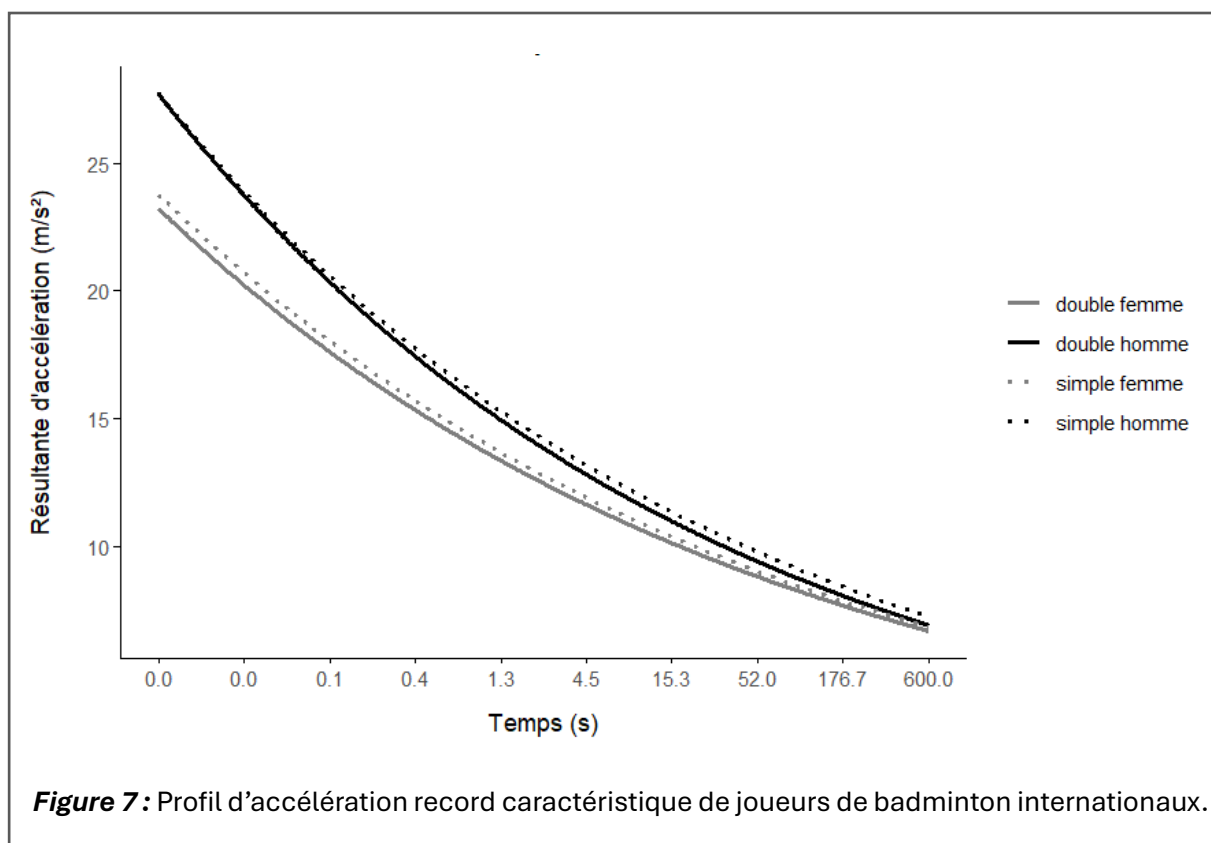


Figure 6 : Profil d'accélération record moyen des différentes séquences de doubles hommes.

En double, le Multidistribution ne présente pas un $AR.min^{-1}$ significativement différent de la technique. Toutefois, les exigences physiques maximales en termes d'accélération du Multidistribution, décrites par le paramètre a du PAR, sont significativement plus élevées que toutes les autres séquences ($p < 0,001$). De plus, le 2C1 est la séquence au paramètre a le plus faible, là où le $AR.min^{-1}$ décrivait une intensité moyenne aussi élevée que celle du match.

Sur chacun des sets des matchs officiels ($n=84$) disputés par les joueurs ($n=15$), un PAR a pu être modélisé ($r^2 > 0,95$). La moyenne des paramètres a et b sur ces matchs a été réalisée pour chaque joueur, afin d'obtenir leur profil d'accélération record individualisé en situation compétitive. L'ANOVA à deux facteurs (tableau 8) indique des différences significatives dans les paramètres du PAR entre les hommes et les femmes ($p < 0,0001$). Plus précisément, les hommes semblent capables de produire de plus grandes accélérations sur les courtes durées, mais subissent une baisse de l'intensité plus rapide que les femmes, caractérisée par le



paramètre b . La corrélation entre les variables a et b est positive et modérée, ($\rho = 0,058 ; p < 0,01$), suggérant que la variation de l'une est en partie expliquée par l'autre, mais pas entièrement. La figure 7 propose une visualisation de ces profils. Aucune différence significative entre les joueurs de double et de simple pour les paramètres du PAR n'a pu être révélée.

Tableau 8 : Paramètres moyens des profils d'accélération record sur des sets de matchs officiels de joueurs internationaux de badminton

	a	b
Joueurs de double (n=13)		
Femme (n=7)	13,81 ± 0,35*	0,26 ± 0,01*
Homme (n=4)	15,51 ± 0,45*	0,29 ± 0,01*
Joueurs de simple (n=4)		
Femme (n=2)	14,14 ± 0,56*	0,26 ± 0,01*
Homme (n=2)	15,84 ± 0,56*	0,28 ± 0,01*

*Les résultats sont présentés en valeur moyenne ± erreur standard d'estimation. *Différences significatives avec l'autre sexe dans la même spécialité.*

IV – Discussion

Les deux principaux objectifs de notre étude étaient de caractériser les demandes mécaniques de joueurs de Badminton de haut niveau et de tracer leurs profils d'accélération record à l'entraînement et en compétition. Nos résultats nous ont permis de classer les différentes séquences d'entraînement en termes d'intensité relativement à celles de match, avec des différences entre les hommes et les femmes et entre les disciplines. De plus, nous avons démontré la faisabilité du profil d'accélération record pour décrire l'activité Badminton qui permet d'apporter une dimension supplémentaire à la comparaison des demandes mécaniques à l'entraînement et en compétition, ainsi que de réaliser un profilage *in-situ* des joueurs de Badminton.

Analyse des exigences physiques des différentes séquences

L'intensité moyenne décrite par l' $AR.min^{-1}$ est plus élevée lors des matchs que lors des entraînements, tant pour le double que pour le simple. Ces résultats rejoignent ceux de Galé-Ansodi en 2018 qui avait montré que le Player Load par minute était plus élevé en match simulé qu'en entraînement en tennis, un sport similaire au badminton en termes de densité d'effort, de durée d'échange et de Player Load par minute (Bisschoff et al., 2016; Edel et al., 2019; Galé-Ansodi et al., 2018). D'autres études dans d'autres sports intermittents de haute intensité comme le basket-ball (Fox et al., 2021; Montgomery et al., 2010), le football australien (Ritchie et al., 2016) ou encore le football (Dios-Alvarez et al., 2021) ont obtenu des résultats similaires. Ces résultats suggèrent que l'intensité moyenne des matchs n'est pas atteinte lors des entraînements. Cette tendance peut s'expliquer par la durée bien plus courte des matchs (autour de 40-60 min

(Phomsoupha & Laffaye, 2015)) comparée aux entraînements proposés aux joueurs de l'étude (environ 2h), permettant aux joueurs de proposer des périodes actives de bien plus haute intensité lors des matchs.

Le 2C1 et le 1C1, en double et en simple respectivement, sont les seuls types de séquences d'entraînement dont l'intensité moyenne semble similaire à celle de match. Le 2C1 est généralement constitué de longs échanges à moyenne intensité afin de travailler un élément technique en particulier, et se caractérise par de très faibles temps de pause. A l'inverse, il a été montré que les matchs compétitifs de badminton sont constitués d'entre 70 et 80% de temps inactifs (Abian-Vicen et al., 2013; Edel et al., 2019). Cette différence de densité d'effort peut expliquer qu'un indicateur d'intensité moyenne comme le $AR.min^{-1}$ ne soit pas capable de distinguer un match d'un 2C1, bien que les périodes actifs de match soient *a priori* plus intenses. Étonnamment, le 2C2 des doubles à l'entraînement ne permet pas d'imiter les exigences physiques du match de double en termes d'intensité moyenne. Cela peut s'expliquer par la grande quantité de variantes du 2C2 proposées par les entraîneurs, certaines n'étant que très peu exigeantes en termes de déplacements du centre de masse (e.g. défense en poste fixe, travail au filet...). Il ne semble pas étonnant que le 2C2 et le 3C2 aient des $AR.min^{-1}$ similaires, puisque ces deux séquences sont généralement utilisées avec les mêmes variantes et objectifs de travail. L'échauffement présente, tant en double qu'en simple, l'intensité moyenne la plus faible. L'objectif de l'échauffement est de préparer le joueur aux exigences physiques maximales de l'entraînement (Cone, 2007; Van Den Tillaar et al., 2019), bien que l' $AR.min^{-1}$ suggère que ce ne serait pas le cas chez les participants de cette étude. Cependant, l'intensité moyenne ne révèle pas les périodes les plus exigeantes sur le plan physique, car celles-ci peuvent être dissimulées par des périodes de plus faible intensité, comme celle de début d'échauffement correspondant généralement à des dégagements fond de court sans déplacement du centre de masse ou des jeux de service au filet. De plus, le multidistribution, dont l'objectif est de surpasser les demandes compétitives sur de courtes périodes (10 – 30 secondes) en augmentant la fréquence d'arrivée des volants, présente une intensité moyenne bien inférieure à celle de match et similaire aux séquences de technique, considérées comme des séquences de faible intensité. Ces résultats peuvent là aussi s'expliquer par la faible capacité des indicateurs d'intensité moyenne à illustrer les périodes de demandes maximales (Weaving et al., 2022), particulièrement dans les sports intermittents.

Nos résultats montrent que chaque entraînement et chaque match pour chaque joueur a pu être modélisé par une fonction exponentielle inverse à deux paramètres telles que :

$$|acc_{res}|(\Delta t) = a \times e^{-b \times \log(\Delta t)}$$

Ces résultats rejoignent ceux de Roell et al. (2020) et de Delaney et al. (2018) qui avaient démontré que cette modélisation avait été possible pour chaque match de chaque joueuse de basketball compétitif féminin professionnel et pour chaque match de chaque joueur de football, respectivement ($r^2 > 0,95$, $r = 0,97$, respectivement) (Delaney, Thornton, et al., 2018; Roell et al., 2020). A la connaissance de l'auteur, cette étude est la première à démontrer que cette modélisation est réalisable pour plusieurs types de séquences d'entraînement dans un sport intermittent de haute intensité (Pinot et Grappe l'ayant réalisée en cyclisme en 2011). Le PAR permet de visualiser les exigences maximales induites par les différentes séquences d'entraînement et les matchs selon plusieurs fenêtres temporelles et complète ainsi l'information apportée par un indicateur d'intensité moyenne comme le $AR.min^{-1}$ (Fox et al., 2021). De plus, il permet aux entraîneurs de pouvoir connaître l'exigence physique de différentes séquences d'entraînement relativement aux matchs selon la fenêtre temporelle souhaitée, ce qui en fait un outil d'analyse plus complet que l'utilisation de fenêtres temporelles juxtaposées. Sa construction s'appuie sur l'utilisation de médianes glissantes, méthode la plus fiable et utilisée pour caractériser les exigences physiques maximales selon plusieurs durées d'efforts (Alonso et al., 2023; Weaving et al., 2022), puisqu'elle permet de limiter la prise en compte de périodes de récupération dans les calculs (Fox et al., 2021).

Le multidistribution est la séquence de jeu générant l'indice d'intensité (paramètre a) le plus élevé chez les doubles, montrant que ce paramètre du PAR permet de caractériser les intensités maximales exigées par la séquence, contrairement à l' $AR.min^{-1}$ rejoignant le constat réalisé par Weaving en 2022 sur les larges différences (jusqu'à 600%) entre l'intensité moyenne et l'intensité maximale. Ce résultat suggère que le multidistribution est capable d'exposer les joueurs de badminton élite à des intensités supérieures à celles de matchs, tout particulièrement sur les courtes durées d'effort. A l'inverse, le 2C1 qui présentait un $AR.min^{-1}$ similaire au match est le type d'entraînement générant la plus faible intensité maximale sur les durées courtes d'efforts, en témoigne le paramètre a , ce qui vient confirmer l'influence de la densité d'effort sur l'intensité moyenne. Contrairement à celles des doubles, les séquences des simples présentant le $AR.min^{-1}$ le plus élevé sont aussi celles ayant le paramètre a le plus élevé. Le match semble ainsi induire des intensités maximales plus élevées que les entraînements. Notons que le multidistribution est aussi réalisé chez les joueurs de simple, mais qu'il a été exclu de l'analyse statistique de cette étude en raison d'un échantillon trop faible. Les séquences de technique des simples consistent en une répétition de mouvements à faible intensité sur de

longues périodes. Ce n'est donc pas étonnant de constater que c'est cette séquence qui présente le paramètre a le plus faible. Tant pour les simples que les doubles, l'échauffement induit des intensités maximales sur les courtes fenêtres temporelles bien inférieures à celles des autres séquences autres que la technique ou le 2C1 (chez les doubles). Ces résultats soulèvent des questions quant à la construction des échauffements, qui sont censés préparer les athlètes aux exigences maximales qui surviendront durant l'entraînement ou le match.

Profilage des joueurs

Le deuxième objectif de cette étude était le profilage des joueurs par l'utilisation du PAR. Pour cela, le PAR caractéristique de chaque joueur a été construit à partir des données issues de 3 à 4 matchs durant les championnats d'Europe de Badminton. L'analyse des paramètres de ces PAR selon la spécialité ou encore le sexe montre des différences significatives entre les hommes et les femmes, mais pas entre les joueurs de simple et de double. Le paramètre a des hommes indique qu'ils possèdent une plus grande capacité à produire de l'accélération quelle que soit la durée d'effort. Cette capacité de production et de maintien d'accélération est liée aux qualités d'activation neuromusculaire (Little & Williams, 2005) et à la masse (2^{nde} loi de Newton, $\vec{F} = m \times \vec{a}$). Les différences intersexes dans les capacités absolues à produire de l'accélération sont connues. Toutefois, les hommes ont un paramètre b plus élevé, suggérant que la diminution de l'intensité maximale produite avec l'augmentation des durées d'effort est plus prononcée que chez les femmes. Plusieurs raisons peuvent expliquer ce résultat. Mathématiquement, le paramètre b n'est pas influencé par les valeurs absolues d'accélération, mais donne une indication du taux de décroissance de l'intensité avec l'augmentation des durées d'effort. Tout d'abord, rappelons que le PAR se base sur une technique de médiane glissante afin de repérer la période la plus intense du match selon différente fenêtre temporelle. Par conséquent, les valeurs d'intensité retenues pour les petites fenêtres temporelles (jusqu'à 30 secondes) concernent très probablement des périodes uniquement composées de temps actifs (la durée d'un échange). Les fenêtres temporelles plus longues calculées dans cette étude (45, 60, 100, 150, 200, 300, 450 et 600 secondes) prennent *a priori* des temps d'inactivité dans le calcul dû à la nature intermittente de l'activité. En effet, lors des jeux de 2016, l'échange le plus long observé était de 53,6 secondes. Or, ce temps d'inactivité est plus élevé chez les hommes que les femmes (i.e. tableau 1, revue de littérature). Ainsi, avec l'augmentation des fenêtres temporelles investiguées, le PAR des femmes concernerait bien plus de temps actif que celui

des hommes, pouvant expliquer le taux de décrétement de l'intensité plus faible de ces dernières. Ce phénomène expliquerait aussi que les PAR des hommes et des femmes tendent à se rejoindre pour les longues fenêtres temporelles, bien que les hommes produisent de plus hautes valeurs d'accélération. Une autre explication de ce phénomène pourrait concerner les différences intersexes dans la capacité à répéter les sprints. En effet, de nombreuses études ont observé un décrétement de la performance plus faible chez les femmes que chez les hommes lors d'un protocole de répétition d'efforts à haute intensité (Billaut & Bishop, 2012; Hanjabam & Kailashiya, s. d.; Richardson & Curtner-Smith, 2010; Tsoukos & Bogdanis, 2023). Ce décrétement de la performance serait lié à des différences physiologiques (Esbjörnsson-Liljedahl et al., 2002; Glaude-Roy et al., 2023). Il est aussi proposé que le décrétement de la performance au fur et à mesure des efforts de haute intensité serait liée au travail mécanique produit lors du premier effort. Plus il est important, plus le décrétement de performance serait fort (Billaut & Bishop, 2012). Cela expliquerait la large corrélation positive ($r = 0,58, p < 0.05$) entre les paramètres a et b . Les hommes produisent des valeurs d'accélération bien plus élevées lors des échanges (en témoigne le paramètre a de la courbe). Puisque les fenêtres temporelles supérieures à 30 secondes contiennent probablement plusieurs échanges, la performance des échanges après le premier pourrait diminuer plus rapidement chez les hommes que les femmes. Voici quelques éléments d'interprétation du paramètre b . L'interprétation de ce paramètre soulève de nombreuses questions. Etudier la relation entre ce paramètre et la performance à des tests de répétition d'efforts à haute intensité permettrait de mieux comprendre les qualités physiques intrinsèques qui y sont liées (Delaney, Thornton, et al., 2018; Roell et al., 2020).

Aucune différence significative n'a pu être révélée entre les joueurs de simple et de double ($p > 0,05$). Pourtant, les joueurs de simple ayant une plus grande distance à couvrir (Liddle & Murphy, 1996), nous pouvons supposer qu'ils sont enclins à produire de plus fortes accélérations ce qui devrait induire une différence dans le paramètre a du PAR. Une des raisons principales pouvant expliquer ce résultat contradictoire est que sur la durée d'un match, un joueur de badminton devra forcément faire preuve de sa capacité maximale d'accélération (ou décélération) sur les temps inférieurs à 30 secondes, qu'il soit en double ou en simple, mais que les simples ont à le faire plus fréquemment. Or, le PAR ne prend pas en compte le volume des efforts mais seulement leur intensité maximale. Le paramètre b ne diffère que peu, ce qui peut s'expliquer par une densité d'effort similaire constatée à haut niveau entre les deux spécialités (tableau 1).

Limites

Notre étude possède certaines limites qu'il convient de prendre en compte lors de la lecture des interprétations ci-dessus. Tout d'abord, l'intensité moyenne est mesurée au moyen de l' $AR.min^{-1}$, qui n'est pas influencé par les valeurs absolues d'accélération, mais seulement par les variations de celles-ci (Bredt et al., 2020). Il est possible que l'utilisation d'un indicateur prenant en compte les valeurs absolues d'accélération résulte en une classification de l'intensité moyenne des séquences différente. De plus, seule la résultante d'accélération était utilisée pour modéliser le PAR, puisque la différenciation des plans dans lesquels sont produites les accélérations étaient hors de la portée de cette étude. Il n'est alors pas possible avec les résultats de cette étude de connaître l'évolution spécifique de l'intensité avec l'augmentation de la durée d'effort dans un plan particulier et selon que ce soit une accélération/décélération. Or, Roell et al. a montré en 2020 que les accélérations verticales et horizontales n'influençaient pas de la même façon l'accélération résultante et suivaient des dynamiques d'évolution différentes avec l'augmentation des durées d'effort. De plus, cette étude de Roell et al. montre que la décélération atteint des valeurs absolues plus élevées que la décélération sur les courtes fenêtres temporelle. Ces résultats suggèrent que la différenciation vertical/horizontal et accélération/décélération apporte une information plus précise sur les qualités des joueurs et les exigences des différentes séquences d'entraînement et de la compétition. De plus, bien que la médiane soit plus robuste aux données extrêmes que la moyenne, et que le filtre passe-bas permet d'éliminer une grande partie des variations dû aux vibrations du capteur et à l'élasticité du support d'attache, il n'est pas à exclure que les résultats obtenus aient été influencés par des erreurs de mesures, particulièrement sur les petites fenêtres temporelles. Enfin, aucune différence n'a été faite entre les joueurs de double et de double mixte, bien que les demandes puissent être supposées différentes.

Conclusion

Nos résultats montrent que les exigences maximales en termes d'accélération en Badminton sur plusieurs fenêtres temporelles peuvent être modélisées par une fonction exponentielle à deux paramètres sur chaque séquence pour chaque joueur, tant à l'entraînement qu'en compétition. Cette modélisation vient compléter l'information apportée par un indicateur d'intensité

moyenne comme le $AR.min^{-1}$ permettant aux staffs d'évaluer les exigences maximales de compétition et d'adapter les entraînements en conséquence. De plus, il est possible à partir de ces modélisations de construire le profil d'accélération record de chaque athlète comprenant les deux paramètres a et b qui semblent refléter des capacités inhérentes et stables des joueurs de badminton. Ces profils permettent d'évaluer de façon non-chronophage, peu-onéreuse et écologique les athlètes selon ces deux paramètres. Toutefois, l'interprétation de ces paramètres reste sujette à des interrogations, que de futures études pourraient éclairer en étudiant la relation entre ces paramètres et les performances à des tests valides d'évaluation des qualités intrinsèques des athlètes (e.g., relation entre F_0 lors d'un profil force-vitesse horizontale et le paramètre a du profil accélération record en Badminton, test de répétition de sprints et le paramètre b). Finalement, ce travail montre que l'accéléromètre est un outil utile dans la caractérisation des exigences de l'activité ainsi que dans le profilage *in-situ* en badminton, bien que des progrès sont attendus afin d'en augmenter la répétabilité, la validité et la capacité à dissocier les plans du mouvement.

Références

- Abián, P., Castanedo, A., Feng, X. Q., Sampedro, J., & Abian-Vicen, J. (2014). Notational comparison of men's singles badminton matches between Olympic Games in Beijing and London. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 14(1), 42-53.
<https://doi.org/10.1080/24748668.2014.11868701>
- Abian-Vicen, J., Castanedo, A., Abian, P., & Sampedro, J. (2013). Temporal and notational comparison of badminton matches between men's singles and women's singles. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 13(2), 310-320.
<https://doi.org/10.1080/24748668.2013.11868650>
- Abián-Vicén, J., Sánchez, L., & Abián, P. (2018). Performance structure analysis of the men's and women's badminton doubles matches in the Olympic Games from 2008 to 2016 during playoffs stage. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 18(4), 633-644.
<https://doi.org/10.1080/24748668.2018.1502975>
- Ahmadi, A. (2014). *Automatic Activity Classification and Movement Assessment During a Sports Training Session using Wearable Inertial Sensors*.
- Allard, P., Martinez, R., Deguire, S., & Tremblay, J. (2022). In-Season Session Training Load Relative to Match Load in Professional Ice Hockey. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 36(2), 486-492. <https://doi.org/10.1519/JSC.00000000000003490>
- Alonso, E., Portes, R., Gómez, M. Á., Parmar, N., Lorenzo, A., & Jiménez Sáiz, S. L. (2023). A Narrative Review of the Most Demanding Scenarios in Basketball : Current Trends and Future Directions. *Journal of Human Kinetics*. <https://doi.org/10.5114/jhk/170838>
- Armstrong, C. (2023). A Comparison of Match Load Between Padel and Singles and Doubles Tennis. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 18(5), 512-522.
<https://doi.org/10.1123/ijsp.2022-0330>
- Arslanoglu, E., Senel, O., & Aydogmus, M. (2014). Analysis of badminton competitions in 2012 London Olympics. *Turkish Journal of Sport and Exercise*, 16(3), 55-55.
<https://doi.org/10.15314/TJSE.201439615>

- Asín-Izquierdo, I., Gutiérrez-García, L., & Galiano, C. (2024). Application of technology for the analysis of Small-Sided Games in football. From complexity to chaos in training design : Reference to number of players, playing space, orientation, time distribution, directionality with goalkeepers, and feedback. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 238(2), 117-125.
<https://doi.org/10.1177/17543371231175946>
- Austin, D. J., & Kelly, S. J. (2014). Professional Rugby League Positional Match-Play Analysis Through the Use of Global Positioning System. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(1), 187-193. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318295d324>
- Billaut, F., & Bishop, D. J. (2012). Mechanical work accounts for sex differences in fatigue during repeated sprints. *European Journal of Applied Physiology*, 112(4), 1429-1436.
<https://doi.org/10.1007/s00421-011-2110-1>
- Bishop, C., Turner, A., Jordan, M., Harry, J., Loturco, I., Lake, J., & Comfort, P. (2022). A Framework to Guide Practitioners for Selecting Metrics During the Countermovement and Drop Jump Tests. *Strength & Conditioning Journal*, 44(4), 95-103.
<https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000677>
- Bisschoff, A. C., Coetzee, B., & Esco, R. M. (2016). Relationship between heart rate, heart rate variability, heart rate recovery and global positioning system determined match characteristics of male, elite, African badminton players. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 16(3), 881-897. <https://doi.org/10.1080/24748668.2016.11868936>
- Boyd, L. J., Ball, K., & Aughey, R. J. (2011). The Reliability of MinimaxX Accelerometers for Measuring Physical Activity in Australian Football. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6(3), 311-321. <https://doi.org/10.1123/ijsp.6.3.311>
- Bredt, S. D. G. T., Chagas, M. H., Peixoto, G. H., Menzel, H. J., & Andrade, A. G. P. D. (2020). Understanding Player Load : Meanings and Limitations. *Journal of Human Kinetics*, 71(1), 5-9. <https://doi.org/10.2478/hukin-2019-0072>

- Brochhagen, J., & Hoppe, M. W. (2022). Metabolic Power in Team and Racquet Sports : A Systematic Review with Best-Evidence Synthesis. *Sports Medicine - Open*, 8(1), 133.
<https://doi.org/10.1186/s40798-022-00525-9>
- Brown, D. M., Dwyer, D. B., Robertson, S. J., & Gastin, P. B. (2016). Metabolic Power Method : Underestimation of Energy Expenditure in Field-Sport Movements Using a Global Positioning System Tracking System. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11(8), 1067-1073. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0021>
- Buchheit, M., Manouvrier, C., Cassirame, J., & Morin, J.-B. (2015). Monitoring Locomotor Load in Soccer : Is Metabolic Power, Powerful? *International Journal of Sports Medicine*, 36(14), 1149-1155. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1555927>
- Calder, A. R., Duthie, G. M., Johnston, R. D., & Engel, H. D. (2021). Physical demands of female collegiate lacrosse competition : Whole-match and peak periods analysis. *Sport Sciences for Health*, 17(1), 103-109. <https://doi.org/10.1007/s11332-020-00659-x>
- Callaway, A. (2015). Measuring Kinematic Variables in Front Crawl Swimming Using Accelerometers : A Validation Study. *Sensors*, 15(5), 11363-11386.
<https://doi.org/10.3390/s150511363>
- Cardoso, P., Tavares, F., Loureiro, N., Ferreira, R., Araújo, J. P., Reis, J., & Vaz, J. R. (2024). In-situ acceleration-speed profile of an elite soccer academy : A cross-sectional study. *Journal of Sports Sciences*, 1-7. <https://doi.org/10.1080/02640414.2024.2305005>
- Carling, C., Bloomfield, J., Nelsen, L., & Reilly, T. (2008). The Role of Motion Analysis in Elite Soccer : Contemporary Performance Measurement Techniques and Work Rate Data. *Sports Medicine*, 38(10), 839-862. <https://doi.org/10.2165/00007256-200838100-00004>
- Chambers, R., Gabbett, T. J., Cole, M. H., & Beard, A. (2015). The Use of Wearable Microsensors to Quantify Sport-Specific Movements. *Sports Medicine*, 45(7), 1065-1081.
<https://doi.org/10.1007/s40279-015-0332-9>
- Chen, W.-H., Chiang, C.-W., Fiolo, N. J., Fuchs, P. X., & Shiang, T.-Y. (2022). Ideal Combinations of Acceleration-Based Intensity Metrics and Sensor Positions to Monitor Exercise Intensity under Different Types of Sports. *Sensors*, 22(7), 2583. <https://doi.org/10.3390/s22072583>

- Chiminazzo, J. G. C., Barreira, J., Luz, L. S. M., Saraiva, W. C., & Cayres, J. T. (2018). Technical and timing characteristics of badminton men's single : Comparison between groups and play-offs stages in 2016 Rio Olympic Games. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 18(2), 245-254. <https://doi.org/10.1080/24748668.2018.1463785>
- Clemente, F., Ramirez-Campillo, R., Beato, M., Moran, J., Kawczynski, A., Makar, P., Sarmiento, H., & Afonso, J. (2023). Arbitrary absolute vs. individualized running speed thresholds in team sports : A scoping review with evidence gap map. *Biology of Sport*, 40(3), 919-943. <https://doi.org/10.5114/biolSport.2023.122480>
- Cohen, C., Texier, B. D., Quéré, D., & Clanet, C. (2015). The physics of badminton. *New Journal of Physics*, 17(6), 063001. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/17/6/063001>
- Colby, M. J., Dawson, B., Peeling, P., Heasman, J., Rogalski, B., Drew, M. K., & Stares, J. (2018). Improvement of Prediction of Noncontact Injury in Elite Australian Footballers With Repeated Exposure to Established High-Risk Workload Scenarios. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(9), 1130-1135. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0696>
- Collet, E. (2024). Left- vs right-handed badminton slice shots : Opposite spinning of the chiral shuttlecock and Magnus effect. *Comptes Rendus Physique*, 25, 1-15. <https://doi.org/10.5802/crphys.174>
- Cone, J. R. (2007). Warming Up for Intermittent Endurance Sports. *Strength & Conditioning Journal*, 29(6), 70-77.
- Coughlan, G. F., Green, B. S., Pook, P. T., Toolan, E., & O'Connor, S. P. (2011). Physical Game Demands in Elite Rugby Union : A Global Positioning System Analysis and Possible Implications for Rehabilitation. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 41(8), 600-605. <https://doi.org/10.2519/jospt.2011.3508>
- Crang, Z. L., Duthie, G., Cole, M. H., Weakley, J., Hewitt, A., & Johnston, R. D. (2021). The Validity and Reliability of Wearable Microtechnology for Intermittent Team Sports : A Systematic Review. *Sports Medicine*, 51(3), 549-565. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01399-1>

- Cudejko, T., Button, K., & Al-Amri, M. (2022). Validity and reliability of accelerations and orientations measured using wearable sensors during functional activities. *Scientific Reports*, 12(1), 14619. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18845-x>
- Delaney, J. A., Cummins, C. J., Thornton, H. R., & Duthie, G. M. (2018). Importance, Reliability, and Usefulness of Acceleration Measures in Team Sports. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(12), 3485-3493. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001849>
- Delaney, J. A., Thornton, H. R., Rowell, A. E., Dascombe, B. J., Aughey, R. J., & Duthie, G. M. (2018). Modelling the decrement in running intensity within professional soccer players. *Science and Medicine in Football*, 2(2), 86-92. <https://doi.org/10.1080/24733938.2017.1383623>
- Dellaserra, C. L., Gao, Y., & Ransdell, L. (2014). *USE OF INTEGRATED TECHNOLOGY IN TEAM SPORTS: A REVIEW OF OPPORTUNITIES, CHALLENGES, AND FUTURE DIRECTIONS FOR ATHLETES*.
- Delves, R. I. M., Aughey, R. J., Ball, K., & Duthie, G. M. (2021). The Quantification of Acceleration Events in Elite Team Sport : A Systematic Review. *Sports Medicine - Open*, 7(1), 45. <https://doi.org/10.1186/s40798-021-00332-8>
- Deutsch, M. U., Kearney, G. A., & Rehrer, N. J. (2007). Time – motion analysis of professional rugby union players during match-play. *Journal of Sports Sciences*, 25(4), 461-472. <https://doi.org/10.1080/02640410600631298>
- Di Prampero, P. E., Fusi, S., Sepulcri, L., Morin, J. B., Belli, A., & Antonutto, G. (2005). Sprint running : A new energetic approach. *Journal of Experimental Biology*, 208(14), 2809-2816. <https://doi.org/10.1242/jeb.01700>
- Díaz-Soto, F. J., Rico-González, M., Palucci Vieira, L. H., Clemente, F. M., Nobari, H., & Pino-Ortega, J. (2023). A systematic review of velocity and accelerometer thresholds in soccer. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 18(5), 1768-1781. <https://doi.org/10.1177/17479541221143346>

- Dios-Alvarez, V. de, Alkain, P., Castellano, J., & Rey, E. (2021). Accumulative Weekly External and Internal Load Relative to Match Load in Elite Male Youth Soccer Players. *Pediatric Exercise Science*, 34(3), 119-124. <https://doi.org/10.1123/pes.2021-0048>
- Duthie, G., Pyne, D., & Hooper, S. (2003). The Reliability of Video Based Time Motion Analysis. *Journal of Human Movement Studies*, 44, 259-272.
- Duthie, G., Pyne, D., & Hooper, S. (2005). Time motion analysis of 2001 and 2002 super 12 rugby. *Journal of Sports Sciences*, 23(5), 523-530. <https://doi.org/10.1080/02640410410001730188>
- Eaton, C., & George, K. (2006). Position specific rehabilitation for rugby union players. Part I : Empirical movement analysis data. *Physical Therapy in Sport*, 7(1), 22-29. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2005.08.006>
- Eaves, J. S. (2015). A history of sports notational analysis : A journey into the nineteenth century. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 15(3), 1160-1176. <https://doi.org/10.1080/24748668.2015.11868859>
- Edel, A., Song, Y., Wiewelhove, T., & Ferrauti, A. (2019). Activity profiles and physiological responses during match play in four popular racquet sports : A literature review. *German Journal of Exercise and Sport Research*, 49(3), 221-231. <https://doi.org/10.1007/s12662-019-00610-4>
- Edwards, S., White, S., Humphreys, S., Robergs, R., & O'Dwyer, N. (2019). Caution using data from triaxial accelerometers housed in player tracking units during running. *Journal of Sports Sciences*, 37(7), 810-818. <https://doi.org/10.1080/02640414.2018.1527675>
- Esbjörnsson-Liljedahl, M., Bodin, K., & Jansson, E. (2002). Smaller muscle ATP reduction in women than in men by repeated bouts of sprint exercise. *Journal of Applied Physiology*, 93(3), 1075-1083. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00732.1999>
- Evenson, K. R., Scherer, E., Peter, K. M., Cuthbertson, C. C., & Eckman, S. (2022). Historical development of accelerometry measures and methods for physical activity and sedentary behavior research worldwide : A scoping review of observational studies of adults. *PLOS ONE*, 17(11), e0276890. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0276890>

- 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>
- Fleureau, A. (2021). *Caractérisation de la charge d'entraînement en Handball élite par comparaison avec les situations de compétitions*.
- Fox, J. L., Conte, D., Stanton, R., McLean, B., & Scanlan, A. T. (2021). The Application of Accelerometer-Derived Moving Averages to Quantify Peak Demands in Basketball : A Comparison of Sample Duration, Playing Role, and Session Type. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(12S), S58-S63. <https://doi.org/10.1519/JSC.00000000000003486>
- Fu, Y., Liu, Y., Chen, X., Li, Y., Li, B., Wang, X., Shu, Y., & Shang, L. (2021). Comparison of Energy Contributions and Workloads in Male and Female Badminton Players During Games Versus Repetitive Practices. *Frontiers in Physiology*, 12, 640199.
<https://doi.org/10.3389/fphys.2021.640199>
- Fuchs, P. X., Chou, Y.-C., Chen, W.-H., Fiolo, N. J., & Shiang, T.-Y. (2023). Accuracy of a local positioning system for time-series speed and acceleration and performance indicators in game sports. *Sports Biomechanics*, 1-15. <https://doi.org/10.1080/14763141.2022.2110513>
- Furlan, N., Waldron, M., Shorter, K., Gabbett, T. J., Mitchell, J., Fitzgerald, E., Osborne, M. A., & Gray, A. J. (2015). Running-Intensity Fluctuations in Elite Rugby Sevens Performance. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10(6), 802-807.
<https://doi.org/10.1123/ijsp.2014-0315>
- Furman, G. R., Lin, C.-C., Bellanca, J. L., Marchetti, G. F., Collins, M. W., & Whitney, S. L. (2013). Comparison of the Balance Accelerometer Measure and Balance Error Scoring System in Adolescent Concussions in Sports. *The American Journal of Sports Medicine*, 41(6), 1404-1410. <https://doi.org/10.1177/0363546513484446>
- Gabbett, T. J. (2016). The training—injury prevention paradox : Should athletes be training smarter and harder? *British Journal of Sports Medicine*, 50(5), 273-280.
<https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095788>

- Gabbett, T. J., Jenkins, D. G., & Abernethy, B. (2012). Physical demands of professional rugby league training and competition using microtechnology. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 15(1), 80-86. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2011.07.004>
- Gabbett, T. J., Polley, C., Dwyer, D. B., Kearney, S., & Corvo, A. (2014). Influence of field position and phase of play on the physical demands of match-play in professional rugby league forwards. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 17(5), 556-561. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2013.08.002>
- Galé-Ansodi, C., Castellano, J., & Usabiaga, O. (2017). More acceleration and less speed to assess physical demands in female young tennis players. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 17(6), 872-884. <https://doi.org/10.1080/24748668.2017.1406780>
- Galé-Ansodi, C., Castellano, J., & Usabiaga, O. (2018). Differences between running activity in tennis training and match-play. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 18(5), 855-867. <https://doi.org/10.1080/24748668.2018.1525679>
- Gamble, A. S. D., Bigg, J. L., Pignanelli, C., Nyman, D. L. E., Burr, J. F., & Spriet, L. L. (2023). Reliability and validity of an indoor local positioning system for measuring external load in ice hockey players. *European Journal of Sport Science*, 23(3), 311-318. <https://doi.org/10.1080/17461391.2022.2032371>
- García, F., Schelling, X., Castellano, J., Martín-García, A., Pla, F., & Vázquez-Guerrero, J. (2022). Comparison of the most demanding scenarios during different in-season training sessions and official matches in professional basketball players. *Biology of Sport*, 39(2), 237-244. <https://doi.org/10.5114/biol sport.2022.104064>
- Gathercole, R., Sporer, B., Stellingwerff, T., & Sleivert, G. (2015). Alternative Countermovement-Jump Analysis to Quantify Acute Neuromuscular Fatigue. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10(1), 84-92. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2013-0413>
- Gaudino, P., Iaia, F., Alberti, G., Strudwick, A., Atkinson, G., & Gregson, W. (2013). Monitoring Training in Elite Soccer Players : Systematic Bias between Running Speed and Metabolic Power Data. *International Journal of Sports Medicine*, 34(11), 963-968. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1337943>

- Ghattas, J., & Jarvis, D. N. (2021). Validity of inertial measurement units for tracking human motion : A systematic review. *Sports Biomechanics*, 1-14.
<https://doi.org/10.1080/14763141.2021.1990383>
- Glaude-Roy, J., Pharand, P., Brunelle, J.-F., & Lemoyne, J. (2023). Exploring associations between sprinting mechanical capabilities, anaerobic capacity, and repeated-sprint ability of adolescent ice hockey players. *Frontiers in Sports and Active Living*, 5, 1258497.
<https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1258497>
- Gómez-Carmona, C. D., Bastida-Castillo, A., García-Rubio, J., Ibáñez, S. J., & Pino-Ortega, J. (2019). Static and dynamic reliability of WIMU PROTM accelerometers according to anatomical placement. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 233(2), 238-248. <https://doi.org/10.1177/1754337118816922>
- Gómez-Carmona, C. D., Bastida-Castillo, A., Ibáñez, S. J., & Pino-Ortega, J. (2020). Accelerometry as a method for external workload monitoring in invasion team sports. A systematic review. *PLOS ONE*, 15(8), e0236643. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236643>
- Gómez-Carmona, C. D., Pino-Ortega, J., Sánchez-Ureña, B., Ibáñez, S. J., & Rojas-Valverde, D. (2019). Accelerometry-Based External Load Indicators in Sport : Too Many Options, Same Practical Outcome? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(24), 5101. <https://doi.org/10.3390/ijerph16245101>
- Gómez-Ruano, M.-Á., Cid, A., Rivas, F., & Ruiz, L.-M. (2020). Serving Patterns of Women's Badminton Medalists in the Rio 2016 Olympic Games. *Frontiers in Psychology*, 11, 136.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00136>
- Gray, A. J., & Jenkins, D. G. (2010). Match Analysis and the Physiological Demands of Australian Football: *Sports Medicine*, 40(4), 347-360. <https://doi.org/10.2165/11531400-000000000-00000>
- Green, R., West, A. T., & Willems, M. E. T. (2023). Notational Analysis and Physiological and Metabolic Responses of Male Junior Badminton Match Play. *Sports*, 11(2), 35.
<https://doi.org/10.3390/sports11020035>

- Grouios, G., Ziagkas, E., Loukovitis, A., Chatzinikolaou, K., & Koidou, E. (2022). Accelerometers in Our Pocket : Does Smartphone Accelerometer Technology Provide Accurate Data? *Sensors*, 23(1), 192. <https://doi.org/10.3390/s23010192>
- Guillain, J.-Y. (2002). *Histoire du Badminton : Du jeu de volant au sport olympique* (Publibook).
- Hamidi Rad, M., Gremeaux, V., Dadashi, F., & Aminian, K. (2021). A Novel Macro-Micro Approach for Swimming Analysis in Main Swimming Techniques Using IMU Sensors. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 597738. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.597738>
- Hanjabam, B., & Kailashiya, J. (s. d.). Original Article Gender Difference in Fatigue Index and its Related Physiology. *Indian J Physiol Pharmacol*.
- 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/ijsp.2013-0121>
- Hodgson, C., Akenhead, R., & Thomas, K. (2014). Time-motion analysis of acceleration demands of 4v4 small-sided soccer games played on different pitch sizes. *Human Movement Science*, 33, 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2013.12.002>
- Hoffmann, D., & Vogt, T. (2024). Does a decade of the rally-point scoring system impact the characteristics of elite badminton matches? *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 24(2), 105-118. <https://doi.org/10.1080/24748668.2023.2272121>
- Hogarth, L. W., Burkett, B. J., & McKean, M. R. (2016). Match demands of professional rugby football codes : A review from 2008 to 2015. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 11(3), 451-463. <https://doi.org/10.1177/1747954116645209>
- Hopkins, W. G., Marshall, S. W., Batterham, A. M., & Hanin, J. (2009). Progressive Statistics for Studies in Sports Medicine and Exercise Science. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 41(1), 3-12. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31818cb278>
- 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), e0192708. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192708>

- Ibáñez, S. J., Gómez-Carmona, C. D., & Mancha-Triguero, D. (2022). Individualization of Intensity Thresholds on External Workload Demands in Women's Basketball by K-Means Clustering : Differences Based on the Competitive Level. *Sensors*, 22(1), 324.
<https://doi.org/10.3390/s22010324>
- Iizuka, T., Hirano, K., Atomi, T., Shimizu, M., & Atomi, Y. (2020). Changes in Duration and Intensity of the World's Top-Level Badminton Matches : A Consideration of the Increased Acute Injuries among Elite Women's Singles Players. *Sports*, 8(2), 19.
<https://doi.org/10.3390/sports8020019>
- Janssen, I., & Sachlikidis, A. (2010). Validity and reliability of intra-stroke kayak velocity and acceleration using a GPS-based accelerometer. *Sports Biomechanics*, 9(1), 47-56.
<https://doi.org/10.1080/14763141003690229>
- Johnston, R. D., Devlin, P., Wade, J. A., & Duthie, G. M. (2019). There Is Little Difference in the Peak Movement Demands of Professional and Semi-Professional Rugby League Competition. *Frontiers in Physiology*, 10, 1285. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01285>
- Kavanagh, R., & Carling, C. (2019). Analysis of external workload in soccer training and competition : Generic versus individually determined speed thresholds. *Science and Medicine in Football*, 3(1), 83-84. <https://doi.org/10.1080/24733938.2018.1562279>
- Kelly, S. J., Murphy, A. J., Watsford, M. L., Austin, D., & Rennie, M. (2015). Reliability and Validity of Sports Accelerometers During Static and Dynamic Testing. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10(1), 106-111. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2013-0408>
- Kerns, J. A., Zwart, A. S., Perez, P. S., Gurchiek, R. D., & McBride, J. M. (2023). Effect of IMU location on estimation of vertical ground reaction force during jumping. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1112866. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1112866>
- Kilit, B., & Arslan, E. (2017). Physiological responses and time-motion characteristics of young tennis players : Comparison of serve vs. return games and winners vs. losers matches. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 17(5), 684-694.
<https://doi.org/10.1080/24748668.2017.1381470>

- Kim, H.-S., Seo, W., & Baek, K.-R. (2017). Indoor Positioning System Using Magnetic Field Map Navigation and an Encoder System. *Sensors*, 17(3), 651. <https://doi.org/10.3390/s17030651>
- King, M., Towler, H., Dillon, R., & McErlain-Naylor, S. (2020). A Correlational Analysis of Shuttlecock Speed Kinematic Determinants in the Badminton Jump Smash. *Applied Sciences*, 10(4), 1248. <https://doi.org/10.3390/app10041248>
- King, T., Jenkins, D., & Gabbett, T. (2009). A time–motion analysis of professional rugby league match-play. *Journal of Sports Sciences*, 27(3), 213-219. <https://doi.org/10.1080/02640410802538168>
- Laffaye, G., Phomsoupha, M., & Dor, F. (s. d.). *Changes in the Game Characteristics of a Badminton Match : A Longitudinal Study through the Olympic Game Finals Analysis in Men's Singles*.
- Lambert, C., Beck, B. R., & Weeks, B. K. (2018). Concurrent Validity and Reliability of a Linear Positional Transducer and an Accelerometer to Measure Punch Characteristics. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(3), 675-680. <https://doi.org/10.1519/JSC.00000000000002284>
- Leite, N., Leser, R., Gonçalves, B., Calleja-Gonzalez, J., Baca, A., & Sampaio, J. (2014). Effect of Defensive Pressure on Movement Behaviour During an Under-18 Basketball Game. *International Journal of Sports Medicine*, 35(09), 743-748. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1363237>
- Lentz-Nielsen, N., Hart, B., & Samani, A. (2023). Prediction of movement in handball with the use of inertial measurement units and machine learning. *Sports Biomechanics*, 1-14. <https://doi.org/10.1080/14763141.2023.2224279>
- Li, R. T., Kling, S. R., Salata, M. J., Cupp, S. A., Sheehan, J., & Voos, J. E. (2016). Wearable Performance Devices in Sports Medicine. *Sports Health: A Multidisciplinary Approach*, 8(1), 74-78. <https://doi.org/10.1177/1941738115616917>
- Liddle, S. D., & Murphy, M. H. (1996). A comparison of the physiological demands of singles and doubles badminton : A heart rate and time/motion analysis. *Journal of Human Movement Studies*, 30, 159-176.

- Linke, D., Link, D., Weber, H., & Lames, M. (2018). Decline in Match Running Performance in Football is affected by an Increase in Game Interruptions. *Journal of Sports Science and Medicine*, 17, 662-667.
- Little, T., & Williams, A. G. (2005). Specificity of Acceleration, Maximum Speed, and Agility in Professional Soccer Players. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 19(1), 76. <https://doi.org/10.1519/14253.1>
- Liu, T.-H., Chen, W.-H., Shih, Y., Lin, Y.-C., Yu, C., & Shiang, T.-Y. (2024). Better position for the wearable sensor to monitor badminton sport training loads. *Sports Biomechanics*, 23(4), 503-515. <https://doi.org/10.1080/14763141.2021.1875033>
- Lockie, R. G., Murphy, A. J., Knight, T. J., & Janse De Jonge, X. A. (2011). Factors That Differentiate Acceleration Ability in Field Sport Athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(10), 2704-2714. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31820d9f17>
- Lovell, R., Scott, D., & Park, L. (2019). Soccer velocity thresholds : Do we really know what's best? *Science and Medicine in Football*, 3(1), 85-86. <https://doi.org/10.1080/24733938.2019.1565361>
- Luig, P., Manchado, C., Perse, M., & Kristan, M. (2008). *Motion characteristics according to playing position in international men's team handball*. 13.
- 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(s2), S2-18-S2-26. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0236>
- Malone, S., Shovlin, A., Collins, K., McRobert, A., & Doran, D. (2021). Is the metabolic power paradigm ecologically valid within elite Gaelic football? *Sport Sciences for Health*, 17(3), 551-561. <https://doi.org/10.1007/s11332-020-00707-6>
- McNamara, D. J., Gabbett, T. J., Chapman, P., Naughton, G., & Farhart, P. (2015). The Validity of Microsensors to Automatically Detect Bowling Events and Counts in Cricket Fast Bowlers. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10(1), 71-75. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2014-0062>

- Michalsik, L., Aagaard, P., & Madsen, K. (2012). Locomotion Characteristics and Match-Induced Impairments in Physical Performance in Male Elite Team Handball Players. *International Journal of Sports Medicine*, 34(07), 590-599. <https://doi.org/10.1055/s-0032-1329989>
- Michalsik, L. B., & Aagaard, P. (2015). Physical demands in elite team handball : Comparisons between male and female players. *THE JOURNAL OF SPORTS MEDICINE AND PHYSICAL FITNESS*, 55(9).
- Miguens, N., Brocherie, F., Moulié, L., Milhet, P., Bon, M., Lassus, P., Toussaint, J.-F., & Sedeaud, A. (2024). Individual In-Situ GPS-Derived Acceleration-Speed Profiling : Toward Automatization and Refinement in Male Professional Rugby Union Players. *Sports Medicine - Open*, 10(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s40798-023-00672-7>
- Ming, C. L., Keong, C. C., & Ghosh, A. K. (2008). *Time Motion and Notational Analysis of 21 Point and 15 Point Badminton Match Play*.
- Montgomery, P. G., Pyne, D. B., & Minahan, C. L. (2010). The Physical and Physiological Demands of Basketball Training and Competition. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 5(1), 75-86. <https://doi.org/10.1123/ijsp.5.1.75>
- Morin, J.-B., Le Mat, Y., 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., & 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>
- Nicolella, D. P., Torres-Ronda, L., Saylor, K. J., & Schelling, X. (2018). Validity and reliability of an accelerometer-based player tracking device. *PLOS ONE*, 13(2), e0191823. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191823>
- Núñez, F. J., Toscano-Bendala, F. J., Suarez-Arrones, L., Martínez-Cabrera, F. I., & De Hoyo, M. (2018). Individualized thresholds to analyze acceleration demands in soccer players using

- GPS (Umbralles individualizados para analizar las demandas en la aceleración en futbolistas usando GPS). *Retos*, 35, 75-79. <https://doi.org/10.47197/retos.v0i35.60402>
- Osgnach, C., Paolini, E., Roberti, V., Vettor, M., & Di Prampero, P. (2016). Metabolic Power and Oxygen Consumption in Team Sports : A Brief Response to Buchheit et al. *International Journal of Sports Medicine*, 37(01), 77-81. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1569321>
- Park, L. A. F., Scott, D., & Lovell, R. (2019). Velocity zone classification in elite women's football : Where do we draw the lines? *Science and Medicine in Football*, 3(1), 21-28. <https://doi.org/10.1080/24733938.2018.1517947>
- Paterson, S., McMaster, D. T., & Cronin, J. (2016). Assessing Change of Direction Ability in Badminton Athletes. *Strength & Conditioning Journal*, 38(5), 18-30. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000241>
- Pfeiffer, K. A., Lisee, C., Westgate, B. S., Kalfsbeek, C., Kuenze, C., Bell, D., Cadmus-Bertram, L., & Montoye, A. H. K. (2023). Using Accelerometers to Detect Activity Type in a Sport Setting : Challenges with Using Multiple Types of Conventional Machine Learning Approaches. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*, 27(1), 60-72. <https://doi.org/10.1080/1091367X.2022.2069467>
- Phomsoupha, M., & Laffaye, G. (2015). The Science of Badminton : Game Characteristics, Anthropometry, Physiology, Visual Fitness and Biomechanics. *Sports Medicine*, 45(4), 473-495. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0287-2>
- Pino-Ortega, J., & Rico-González, M. (2021). Review of Ultra-Wide Band in Team Sports. In A. Sabban (Éd.), *Innovations in Ultra-Wideband Technologies*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94591>
- Pino-Ortega, J., Rojas-Valverde, D., Gómez-Carmona, C. D., Bastida-Castillo, A., Hernández-Belmonte, A., García-Rubio, J., Nakamura, F. Y., & Ibáñez, S. J. (2019). Impact of Contextual Factors on External Load During a Congested-Fixture Tournament in Elite U'18 Basketball Players. *Frontiers in Psychology*, 10, 1100. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01100>

- 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>
- Preatoni, E., Bergamini, E., Fantozzi, S., Giraud, L. I., Orejel Bustos, A. S., Vannozzi, G., & Camomilla, V. (2022). The Use of Wearable Sensors for Preventing, Assessing, and Informing Recovery from Sport-Related Musculoskeletal Injuries : A Systematic Scoping Review. *Sensors*, 22(9), 3225. <https://doi.org/10.3390/s22093225>
- Rana, M., & Mittal, V. (2021). Wearable Sensors for Real-Time Kinematics Analysis in Sports : A Review. *IEEE Sensors Journal*, 21(2), 1187-1207. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3019016>
- Raper, D. P., Witchalls, J., Philips, E. J., Knight, E., Drew, M. K., & Waddington, G. (2018). Use of a tibial accelerometer to measure ground reaction force in running : A reliability and validity comparison with force plates. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 21(1), 84-88. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2017.06.010>
- Reina, M., Garcia-Rubio, J., Pino-Ortega, J., & Ibáñez, S. J. (2019). The Acceleration and Deceleration Profiles of U-18 Women's Basketball Players during Competitive Matches. *Sports*, 7, 165-174. <https://doi.org/10.3390/sports7070165>
- Ren, R., Spaan, J., Jordan, A., Shafiro, A., & Su, E. P. (2023). Novel Use of an Accelerometer to Assess Load Asymmetry Over Time After Hip Resurfacing Arthroplasty. *The Journal of Arthroplasty*, 38(7), S58-S64. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2023.04.015>
- Richardson, M. T., & Curtner-Smith, M. (2010). Effect of gender on
 faitnigteunesaitnydrreepceoavteedryspforlilnotwIpineCrgfmoramAxaimncael C. M.
 LAURENT 1, J. M. GREEN 2, P. A. BISHOP 3, J. SJÖKVIST 4, 5, R. E. SCHUMACKER
 6,. *THE JOURNAL OF SPORTS MEDICINE AND PHYSICAL FITNESS*, 50(3).
- Rico-González, M., Los Arcos, A., Clemente, F. M., Rojas-Valverde, D., & Pino-Ortega, J. (2020). Accuracy and Reliability of Local Positioning Systems for Measuring Sport Movement Patterns in Stadium-Scale : A Systematic Review. *Applied Sciences*, 10(17), 5994. <https://doi.org/10.3390/app10175994>

- Ritchie, D., Hopkins, W. G., Buchheit, M., Cordy, J., & Bartlett, J. D. (2016). Quantification of Training and Competition Load Across a Season in an Elite Australian Football Club. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11(4), 474-479.
<https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0294>
- Roecker, K., Mahler, H., Heyde, C., Röhl, M., & Gollhofer, A. (2017). The relationship between movement speed and duration during soccer matches. *PLOS ONE*, 12(7), e0181781.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181781>
- Roell, M., Helwig, J., Gollhofer, A., & Roecker, K. (2020). Duration-Specific Peak Acceleration Demands During Professional Female Basketball Matches. *Frontiers in Sports and Active Living*, 2, 33. <https://doi.org/10.3389/fspor.2020.00033>
- Roell, M., Mahler, H., Lienhard, J., Gehring, D., Gollhofer, A., & Roecker, K. (2019). Validation of Wearable Sensors during Team Sport-Specific Movements in Indoor Environments. *Sensors*, 19(16), 3458. <https://doi.org/10.3390/s19163458>
- Rojas-Valverde, D., Gómez-Carmona, C. D., Fernández-Fernández, J., García-López, J., García-Tormo, V., Cabello-Manrique, D., & Pino-Ortega, J. (2020). Identification of games and sex-related activity profile in junior international badminton. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 20(3), 323-338.
<https://doi.org/10.1080/24748668.2020.1745045>
- Rojas-Valverde, D., Rico-González, M., Giménez-Egido, J. M., & Pino-Ortega, J. (2021). Physical fitness and conditioning in badminton school matches : A comparison between modalities and sexes. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 21(1), 51-60.
<https://doi.org/10.1080/24748668.2020.1845535>
- Ryan, M., Malone, S., & Collins, K. (2018). Acceleration Profile of Elite Gaelic Football Match Play. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(3), 812-820.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001818>
- Saito, T., Matsumura, N., Kawamoto, S., Doi, N., Aoyama, T., & Nagai-Tanima, M. (2023). Analyses of actions which cause anterior cruciate ligament injuries in the national basketball association

- players : YouTube-based video analyses. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 15(1), 130. <https://doi.org/10.1186/s13102-023-00747-8>
- Saponara, S. (2017). Wearable Biometric Performance Measurement System for Combat Sports. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 66(10), 2545-2555. <https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2677679>
- 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>
- Schutz, Y., & Herren, R. (2000). Assessment of speed of human locomotion using a differential satellite global positioning system: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(3), 642-646. <https://doi.org/10.1097/00005768-200003000-00014>
- Scott, M. T. U., Scott, T. J., & Kelly, V. G. (2016). THE VALIDITY AND RELIABILITY OF GLOBAL POSITIONING SYSTEMS IN TEAM SPORT: A BRIEF REVIEW. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(5), 1470-1490.
- Segarra, D., Caballeros, J., Aguilar, W. G., Samà, A., & Rodríguez-Martín, D. (2019). Orientation Estimation Using Filter-Based Inertial Data Fusion for Posture Recognition. In S. Gilbert, D. Hughes, & B. Krishnamachari (Éds.), *Algorithms for Sensor Systems* (Vol. 11410, p. 220-233). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14094-6_15
- Senington, B., Lee, R. Y., & Williams, J. M. (2020). Biomechanical risk factors of lower back pain in cricket fast bowlers using inertial measurement units : A prospective and retrospective investigation. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 6(1), e000818. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2020-000818>
- Shan, C. Z., Ming, E. S. L., Rahman, H. A., & Fai, Y. C. (2015). Investigation of upper limb movement during badminton smash. *2015 10th Asian Control Conference (ASCC)*. <https://doi.org/10.1109/ASCC.2015.7244605>
- Sheppard, J. M., & Young, W. B. (2006). Agility literature review : Classifications, training and testing. *Journal of Sports Sciences*, 24(9), 919-932.

- Smith, T. B., Tarrant, O., & McIntosh, N. (2018). Metabolic Power May Be a Useful Tool for Monitoring Locomotor Load in Team Sports Involving Repetitive, Intermittent, Intensive Running Sprints. *Journal of Physical Education & Sport Sciences*, 11(3), 167-168.
- Sweeting, A. J., Cormack, S. J., Morgan, S., & Aughey, R. J. (2017). When Is a Sprint a Sprint? A Review of the Analysis of Team-Sport Athlete Activity Profile. *Frontiers in Physiology*, 8, 432. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00432>
- Tojo, O., Konstantinos, S., João, T., Paulo, P., & João, B. (2023). Effective playing time affects technical-tactical and physical parameters in football. *Frontiers in Sports and Active Living*. <https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1229595>
- Torres-Luque, G., Carlos Blanca-Torres, J., Cabello-Manrique, D., & Kondric, M. (2020). Statistical Comparison of Singles Badminton Matches at the London 2012 and Rio De Janeiro 2016 Olympic Games. *Journal of Human Kinetics*, 75(1), 177-184. <https://doi.org/10.2478/hukin-2020-0046>
- Torres-Luque, G., Fernández-García, Á. I., Blanca-Torres, J. C., Kondric, M., & Cabello-Manrique, D. (2019). Statistical Differences in Set Analysis in Badminton at the RIO 2016 Olympic Games. *Frontiers in Psychology*, 10, 731. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00731>
- Townshend, A. D., Worringham, C. J., & Stewart, I. B. (2008). Assessment of Speed and Position during Human Locomotion Using Nondifferential GPS. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 40(1), 124-132. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e3181590bc2>
- Tsai, W.-H., & Wen, K.-A. (2022). SoC Design for Mobile Real-time Badminton Stroke Classification Design. *2022 19th International SoC Design Conference (ISOCC)*.
- Tsoukos, A., & Bogdanis, G. C. (2023). Physiological Responses and Fatigue during a Repeated Shuttle-Sprint Running Test in Adolescent Schoolchildren : A Comparison between Sexes and Fatigue Calculation Methods. *Children*, 10(6), 1041. <https://doi.org/10.3390/children10061041>
- Van Den Tillaar, R., Lerberg, E., & Von Heimburg, E. (2019). Comparison of three types of warm-up upon sprint ability in experienced soccer players. *Journal of Sport and Health Science*, 8(6), 574-578. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2016.05.006>

- Vescovi, J. D. (2019). Women's soccer velocity thresholds : Statistical techniques or physiological metrics – context is critical. *Science and Medicine in Football*, 3(1), 81-82.
<https://doi.org/10.1080/24733938.2018.1562278>
- Villajero-Garcia, D. H., Moreno-Villanueva, A., Soler-Lopez, A., Reche-Soto, P., & Pino-Ortega, J. (2023). Use, Validity and Reliability of Inertial Movement Units in Volleyball : Systematic Review of the Scientific Literature. *Sensors*, 23. <https://doi.org/10.3390/s23083960>
- Wang, W.-F., Yang, C.-Y., & Wang, D.-Y. (2015). Analysis of Movement Effectiveness in Badminton Strokes with Accelerometers. *Genetic and Evolutionary Computing*, 95-104.
- Weaving, D., Young, D., Riboli, A., Jones, B., & Coratella, G. (2022). The Maximal Intensity Period : Rationalising its Use in Team Sports Practice. *Sports Medicine - Open*, 8(1), 128.
<https://doi.org/10.1186/s40798-022-00519-7>
- Wisbey, B., Montgomery, P. G., Pyne, D. B., & Rattray, B. (2010). Quantifying movement demands of AFL football using GPS tracking. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(5), 531-536. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2009.09.002>
- Worsey, M., Espinosa, H., Shepherd, J., & Thiel, D. (2019). Inertial Sensors for Performance Analysis in Combat Sports : A Systematic Review. *Sports*, 7(1), 28.
<https://doi.org/10.3390/sports7010028>
- Wu, F., Zhang, K., Zhu, M., Mackintosh, C., Rice, T., Gore, C., Hahn, A., & Holthous, S. (s. d.). *An Investigation of an Integrated Low-cost GPS, INS and Magnetometer System for Sport Applications*.
- Wundersitz, D. W. T., Gastin, P. B., Robertson, S., Davey, P. C., & Netto, K. J. (2015). Validation of a Trunk-mounted Accelerometer to Measure Peak Impacts during Team Sport Movements. *International Journal of Sports Medicine*, 36(9), 742-746. <http://dx.doi.org/10.1055/s-0035-1547265>
- Wundersitz, D. W. T., Gastin, P. B., Robertson, S. J., & Netto, K. J. (2015). Validity of a Trunk-Mounted Accelerometer to Measure Physical Collisions in Contact Sports. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10(6), 681-686.
<https://doi.org/10.1123/ijsp.2014-0381>

- Wundersitz, D. W. T., Netto, K. J., Aisbett, B., & Gatin, P. B. (2013). Validity of an upper-body-mounted accelerometer to measure peak vertical and resultant force during running and change-of-direction tasks. *Sports Biomechanics*, 12(4), 403-412.
<https://doi.org/10.1080/14763141.2013.811284>
- Yang, C.-C., & Hsu, Y.-L. (2010). A Review of Accelerometry-Based Wearable Motion Detectors for Physical Activity Monitoring. *Sensors*, 10(8), 7772-7788. <https://doi.org/10.3390/s100807772>
- Young, W., Dos'Santos, T., Harper, D., Jefferys, I., & Talpey, S. (2022). Agility in Invasion Sports : Position Stand of the IUSCA. *International Journal of Strength and Conditioning*, 2(1).
<https://doi.org/10.47206/ijsc.v2i1.126>

Annexes

Annexe 1 : Attestation de stage.



ATTESTATION DE STAGE OU D'EMPLOI

(A TRANSMETTRE AU TUTEUR)

MASTER EOPS SEPHN – M 1

Option : Sport, Expertise, Performance de haut niveau

Année 2023 / 2024

ATTESTATION DE ☒ STAGE ou ☐ D'EMPLOI

Je soussigné (e),...Enzo HOLLVILLE..., agissant en qualité de ...scientifique du sport et de la donnée
...de la structureFFBaD..... et située11 avenue du Tremblay, 75012 Paris

Certifie que (Nom et prénom du stagiaire/employé) :Mathis Tachdjian

Etudiant (e) à l'INSEP en convention avec l'Université de Paris Cité en Master EOPS SEPHN,

☒ A effectué un stage / ☐ Est employé (e) dans notre structure en qualité de (indiquer
fonction/poste rempli)

Sous la responsabilité de (nom prénom du tuteur-responsable) : HOLLVILLE Enzo

Pendant la période du ...01/10/2023.....au ...30/06/2024..... pour une durée de ...8 mois.

Il exerce ses responsabilités seul : ~~OUI~~ / NON

Si responsabilités dans une équipe (indiquer nombre et fonctions des personnes de l'équipe) :

Les responsabilités remplies par le stagiaire

Mathis a eu la gestion de la collecte de données quotidiennes à l'entraînement issus de centrales inertielles dans le but de quantifier la charge d'entraînement des athlètes du pôle France Olympique de Badminton.

Il a également pris en charge des séances de préparation physique en autonomie.

Objectif du stage et principales missions confiées au stagiaire/remplies par le salarié

L'objectif principal du stage était d'aider les préparateurs physiques, sport scientists et data scientists dans la récolte de données d'entraînement et de compétitions afin de caractériser la charge mécanique en badminton de haut niveau. Mathis a ainsi eu la responsabilité de la collecte de données, ainsi que de son traitement et sa visualisation auprès des différents acteurs de l'environnement de performance du pôle Olympique. Son mémoire de recherche s'intéresse à

décrire et comparer les différents types de contenus d'entraînement en badminton afin de mieux calibrer la charge d'entraînement. Dans un second temps, les perspectives de son travail doivent permettre de réaliser l'évaluation de profils accélération-temps en badminton afin de quantifier les demandes d'entraînements et de compétitions individuelles de chacun des athlètes du pôle France.

Appréciation du tuteur sur la qualité du travail effectué par le stagiaire / Avis motivé du directeur de stage :

Evaluation quantitative :

Nombre d'heures en présence du tuteur : 2-2.5 jours par semaine pendant 8 mois

Nombre d'heures sur le terrain : 12h par semaine à partir de février

Durée totale estimée : 2-2.5 jours par semaine pendant 8 mois

Evaluation qualitative :

Compétences développées au cours du stage (au regard de celles que le stagiaire n'avait pas en arrivant) :

- Captation de données centrales inertielles
- Traitement/automatisation via langage de programmation Python
- Connaissances théoriques en badminton de haut niveau
- Accompagnement scientifique des équipes de France séniors de Badminton

Comportement : Indiquer dans une échelle de 1(niveau le plus bas) à 5 (niveau le plus haut) le niveau de l'étudiant dans ces 4 critères :

Investissement : 5	Atteinte des objectifs : 4.5
Efficacité dans le travail : 4	Force de proposition : 4.5

Stage validé par le tuteur de stage : **oui**.

Si non à justifier :

Conseils à donner au stagiaire :

Tu gagnerais à être plus patient dans cet environnement professionnel particulier où se confondent beaucoup de profils différents qui nécessitent du temps à comprendre.

Tu gagnerais aussi à moins te disperser et favoriser certaines solutions en interne. La curiosité est une qualité essentielle et rencontrer/partager avec d'autres collègues représente une part importante de la vie d'étudiant et de scientifique du sport. Néanmoins, certaines solutions se trouvent dans ta structure d'accueil et nécessitent pour toi de mieux identifier ces ressources.

Cela renforcerait également ta position et ton profil au sein de ton environnement d'accueil. N'oublie pas l'importance de t'accomplir et rayonner à travers les objectifs communs de la structure.

Fait à Paris.....le11/06/2024.....

(Cachet de la structure et signature du responsable de la structure ou du tuteur de stage)

Fédération Française de Badminton
9-11 avenue Michelet
93583 SAINT OUEEN Cedex
Tél : 01 49 45 07 07 - Fax : 01 49 45 18 71



Annexe 2 : autorisation de soutenance



Autorisation de soutenance du mémoire Master EOPS SEPHN

Niveau :

☒ M1

☐ M2

Domaine :

☒ Accompagnement scientifique

☐ Conduite de projet en milieu fédéral

Je soussigné, Enzo HOLLVILLE

autorise l'étudiant(e) : Mathis TACHDJIAN

à soutenir son mémoire dans le cadre du Master Sport Expertise et Performance Sport de Haut Niveau.

Fait à Paris

Le 11 juin 2024

Signature :



Abstract

Purpose: Characterizing the physical activity of athletes is of paramount importance to adapt training. The aim of this study was to analyze the physical demands of high-level badminton players and to compute an in-situ profile.

Method: 27 international badminton players wore an accelerometer every day for 4 months. Physical demands were analyzed through acceleration data and a moving median technique. The relationship between peak demands and effort duration was modeled by an exponential function.

Results: All sessions can be modeled by a 2-parameters exponential function ($r^2 > 0.95$). Mean intensity and peak demands provide different information about the physical demands of training sessions and matches. Function parameters allow for player profiling and load monitoring.

Conclusion: Peak demands in badminton training sessions and matches can be modeled by a two-parameter function, which allows for player profiling and peak physical demands analysis. When analyzing physical demands, both mean intensity and peak demands should be reported.

Key words : accelerometer - characterisation - profiling - badminton - training

Résumé

Objectifs : La caractérisation des exigences physiques des athlètes est primordiale pour adapter l'entraînement. L'objectif de cette étude est d'analyser les exigences physiques du badminton de haut niveau et de profiler les joueurs.

Méthode : 27 joueurs de badminton internationaux ont porté un accéléromètre pendant 4 mois. Les exigences physiques étaient analysées par les données d'accélération et une technique de médiane glissante. La relation entre les demandes maximales et la durée d'effort a été modélisée par une fonction exponentielle.

Résultats : Les résultats montrent que toutes les sessions ont pu être modélisées par une fonction exponentielle à deux paramètres ($r^2 > 0,95$). L'intensité moyenne et les intensités maximales apportent une information distincte sur les exigences physiques imposées aux joueurs.

Conclusion : Les paramètres de la fonction semblent présenter un véritable intérêt dans le cadre du profilage. L'utilisation de l'intensité moyenne et des intensités maximales permet une meilleure représentation des exigences.

Mots-clés : accéléromètre - caractérisation - profilage - badminton - entraînement