

Université de Paris

École doctorale 566 : Sciences du sport, de la motricité et du mouvement humain
Laboratoire : Institut de recherche biomédicale et d'épidémiologie du sport, Sport, Expertise
et Performance - EA 7370

CARACTÉRISATION DE LA CHARGE D'ENTRAÎNEMENT EN HANDBALL ÉLITE PAR COMPARAISON AVEC LES SITUATIONS DE COMPÉTITIONS.

Par Antoine Fleureau

Thèse de doctorat en Sciences du Sport et du Mouvement Humain

Présentée et soutenue publiquement le vendredi 10 Décembre 2021

Devant un jury composé de :

Président : **Jacques PRIOUX**, PU, ENS, Université de Rennes

Rapporteurs : **Jacques PRIOUX**, PU, ENS, Université de Rennes
Frédérique HINTZY, MCU-HDR, Université Savoie-Mont-Blanc

Examineurs : **Laurent BOSQUET**, PU, Université de Poitiers
Claire THOMAS-JUNIUS, PU, Université d'Évry

Direction de Thèse : **Martin BUCHHEIT** (Directeur), Université de Paris, Laboratoire
SEP - INSEP ; Directeur de la performance, LOSC Lille ; Head of
Performance Intelligence Research at Kitman Labs
Giuseppe RABITA (Co-directeur), Université de Paris, Chercheur,
HDR, Laboratoire SEP - INSEP

Membres Invités : **Susana POVOAS**, Associate Professor, University of Maia, Portugal
Mathieu LACOME (Co-encadrant), Université de Paris, Laboratoire
SEP - INSEP ; Chief Performance & Analytics Officer chez Parma
Calcio 1913, INSEP

AVANT-PROPOS

Ce manuscrit est l'aboutissement d'un parcours entamé en août 2018. Ces trois années de doctorat représentent une part importante de ma vie et je souhaite, par ces quelques lignes, remercier les personnes qui ont contribué à ce travail.

En premier lieu, je tenais à remercier Mr Jacques Prioux et Mme Frédérique Hintzy d'avoir accepté de rapporter ce travail de thèse. Je remercie également Mr Laurent Bosquet, Mmes Claire Thomas-Junius et Susana Póvoas pour votre participation en tant membres du jury. C'est un honneur de pouvoir compter sur votre présence et vous présenter mon travail. Je suis impatient d'échanger avec vous lors de la soutenance.

Je souhaiterais remercier le Club du Paris Saint-Germain Football Club, et en particulier sa section Handball, pour son soutien matériel et financier sans lequel je n'aurais pu réaliser cette thèse. En particulier je souhaite remercier Arthur Yapo et Bruno Martini qui ont permis la mise en place de ce travail de recherche. Merci pour votre aide précieuse et au plaisir de partager avec vous les résultats de ces travaux auxquels vous êtes pleinement associés.

Au même titre je souhaite remercier l'Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance, et en particulier le laboratoire Sport, Expertise et Performance. En particulier je souhaite remercier Gaël Guilhem, directeur du laboratoire, d'avoir accepté de soutenir ce projet de recherche. Merci pour ton aide et ton accompagnement. Je serais ravi d'échanger avec toi au sujet de mes travaux auxquels tu es également pleinement associé.

Dans ces quelques lignes, je souhaiterais remercier ma direction de thèse, un trio d'experts qui m'a offert l'opportunité, il y a trois ans (et demi presque), de me lancer dans ce projet. J'espère que vous êtes fiers de l'aboutissement de notre travail et de l'étudiant que je suis devenu. C'est la fin d'une belle collaboration que j'espère terminer comme il se doit le 10 décembre prochain. Merci infiniment. Giuseppe, merci pour ta confiance et ta rigueur, tes remarques et commentaires toujours pertinents. Je suis très heureux d'avoir pu partager cette thèse avec toi. Martin, merci également pour ta confiance et la justesse de tes propos. Je retiendrai la pertinence de tes remarques pour l'ensemble des questions de recherche. Je suis honoré de t'avoir eu comme directeur de thèse. Mathieu, je te remercie d'avoir accepté de Co-encadrer ce travail et de t'être tant investi dans ce projet. J'ai énormément appris à tes côtés. Merci pour ta

disponibilité. Tu as été, au-delà de tes qualités humaines, une source d'inspiration dans mon quotidien de doctorant. Un immense merci.

Je tiens également à remercier tout particulièrement Antoine Couturier et Cédric Leduc pour vos expertises respectives qui m'ont permis de m'enrichir personnellement et d'enrichir mon travail. Merci Antoine pour ton aide, plus que précieuse, sur mes questions méthodologiques en début de thèse. Merci à toi aussi Cédric pour ton aide précieuse pendant la rédaction des articles scientifiques. À tous les deux, ces quelques lignes ne suffiront pas à vous remercier à la juste valeur de votre apport dans ce travail de recherche.

J'associe les membres du laboratoire SEP à ces remerciements, tout particulièrement Alexis et Antonio. Il m'est impossible de ne pas citer mes collègues doctorants dans ces remerciements. Ces collègues qui partagent chaque jour les mêmes angoisses et doutes qui nous rapprochent. Merci à Enzo, Robin, Jérôme, Mathilde et Anis pour nos échanges toujours enrichissants. Vous faites partie de ces belles rencontres que nous offrent une thèse. Je suis impatient de recroiser vos chemins en France ou à l'étranger. Bien évidemment merci aux autres doctorants pour tous ces bons moments, particulièrement Benjamin Adèle, Allison, Mildred, Mathilde, Valentine.

Je remercie chaleureusement l'ensemble des personnes du PSG Handball pour tout le travail réalisé avec vous durant ces trois saisons. Merci à Arthur et Saïd pour toutes ces heures passées à échanger. Promis on finira par boire un coup ensemble. Merci à Régis, Kiki, Nico, Jonas, Flo et Fab pour tous ces échanges. Je suis heureux de vous avoir rencontrés et j'espère bien pouvoir vous retrouver pour continuer à échanger. Merci à Jota et Raúl pour votre considération envers mon travail, et l'ensemble des moments partagés ensemble. Merci à Thierry, PA, Denis, Franck pour tous ces moments partagés. Nos échanges plus ou moins sérieux du vendredi soir me manqueront. Ces remerciements ne sauraient être complets sans un mot pour l'ensemble des joueurs de l'équipe professionnelle qui ont tous accepté mes sollicitations. Je ne saurais vous remercier pour tous ces moments passés ensemble et toutes ces émotions que vous m'avez permis de vivre. Merci également aux joueurs du Centre de Formation dont j'ai pu suivre l'évolution et à qui je souhaite de réussir dans leurs projets. Enfin un merci spécial pour Abdoul, ta bonne humeur et ton accompagnement dans le quotidien du club, de l'ouverture du gymnase à sa fermeture, m'auront aidé bien plus que tu ne voudrais l'admettre. Merci pour tous nos échanges et pour ta générosité.

Un merci tout spécial pour toi Mariia sans qui cette thèse n'aurait certainement pas été la même. Merci d'être là pour moi au quotidien. Je remercie mes amis de toujours Clément, Aurélie, Zoé, Laëtitia. Merci pour tout. Vous êtes les meilleurs, et ce depuis toujours. Je garde un peu de pudeur pour vous exprimer toute l'amitié et l'amour que j'ai pour vous.

Enfin, ces dernières lignes s'adressent à ma famille, mes grands-parents, mon frère et mes parents. Vous avez été mes premiers supporters, ceux avec qui j'ai partagé mes nombreux doutes. Vous avez été d'un soutien inestimable de chaque instant. Je suis tellement fier de partager ce travail avec vous. Ces quelques lignes ne suffiront pas à exprimer mes sentiments les plus forts envers vous. Merci pour tout et plus encore.

CONTEXTE

Ce travail de thèse a été réalisé dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE) entre le Paris-Saint-Germain Football Club et le laboratoire Sport, Expertise et Performance (SEP) de l'Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance (INSEP). Le club s'est historiquement doté d'une cellule performance ayant pour ambition de permettre un accompagnement scientifique de la performance des différentes équipes afin de contribuer à l'optimisation de leurs performances. C'est dans ce cadre que mon travail a pu être mis en place, auprès de la section Handball du Club, et plus précisément de l'équipe professionnelle et de celle du centre de formation. J'ai ainsi pu être embauchée par le club en tant que Sport Scientist, avec le double objectif de fournir des informations, relative à l'activité des joueurs sur le terrain, aux staffs des équipes et de mener un travail de recherche sur l'activité Handball. Une part importante de mon travail de recherche a consisté en la collecte des données de performance physique des joueurs à l'aide d'un nouvel outil de suivi instantané de la position sur le terrain. Cette collecte se faisait à la fois durant les entraînements et les matchs, durant l'ensemble de la présaison et de la saison des deux équipes. Le système utilisé étant installé à demeure au stade Pierre de Coubertin, site d'entraînement et de compétition des équipes du club, seuls les séances effectuées à domicile ont pu être mesurées. Elle donnait lieu à des comptes-rendus quotidiens et hebdomadaires en direction des membres du staff, Entraîneurs, Préparateurs Physiques, Kinésithérapeutes et Médecins. J'étais présent au club 80% de mon temps de travail, ce qui m'a permis d'être pleinement assimilé au staff des deux équipes et me permettait d'échanger avec l'ensemble de celui-ci pour répondre aux besoins personnels de chacun. Les 20% restant était passé à l'INSEP, au sein du laboratoire SEP, pour effectuer l'analyse des données en vue de répondre aux enjeux de ce travail de recherche qui étaient de caractériser la charge d'entraînement en Handball à partir de comparaison avec les situations de compétition.

Ce travail a fait l'objet des publications et communications suivantes

Publications dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture

Fleureau A., Lacombe M., Buchheit M., Couturier A., & Rabita G. (2020). Validity of an ultra-wideband local positioning system to assess specific movements in handball. *Biology of Sport*, 37(4), 351-357. <https://doi.org/10.5114/biolsport.2020.96850>

Fleureau A., Lacombe M., Buchheit M., Couturier A., & Rabita G. Peak locomotor intensity in Elite Handball players: a first insight into player position differences and training practices. *Journal of Strength and Conditioning Research* (Accepté).

Fleureau A., Lacombe M., Buchheit M., Couturier A., & Rabita G. The effect of congested fixtures on training load periodization in elite Handball players. *PlosOne* (soumis).

Communications dans des congrès internationaux

Présentation d'un Poster non débattu, au format PowerPoint pré-enregistré :

A. Fleureau, G. Rabita, C. Leduc, M. Buchheit, M. Lacombe (2020). Peak locomotor intensity in elite Handball matches: effect of players positions and training practice. Abstr-ID: 638, Presentation format: Mini-Oral, Session name: CP-AP03 - Training and testing II - Cross - sectional **26th Virtual Congress of the European College of Sport Science**

Communications dans des congrès nationaux

Présentation orale de 10 minutes, avec support visuel :

Fleureau A., Lacombe M., Buchheit M., Couturier A., and Rabita G. (2019). "Validity of an Ultra-Wideband Local Positioning System to Assess Specific Movements in Handball."

À la Recherche de la Performance - La performance, terrain d'innovation. **INSEP**

Table des matières

AVANT-PROPOS	4
TABLE DES MATIÈRES	10
LISTE DES FIGURES	13
LISTE DES TABLEAUX	16
LISTE DES ABRÉVIATIONS	18
INTRODUCTION GÉNÉRALE	19
REVUE DE LITTÉRATURE	22
1 L'ACTIVITÉ HANDBALL.....	22
2. OUTILS DE QUANTIFICATION DE L'ACTIVITÉ	26
2.1 L'Analyse vidéographique.....	27
2.1.1 Analyse par notation	27
2.1.2 Les méthodes de suivi semi-automatique.....	28
2.2 Les outils GPS & LPS.....	30
2.2.1 Principe de fonctionnement.....	31
2.2.2 Validité et Reproductibilité de la mesure.....	34
2.3 Bilan	38
3. ANALYSE DE L'ACTIVITÉ DES JOUEURS LORS DES COMPÉTITIONS ÉLITES	40
3.1 Temps de jeu effectif des joueurs	41
3.2 Volume de l'activité	42
3.3 Distribution du volume de l'activité	45
3.4 Actions de haute intensité	49
3.5 Intensité de l'activité.....	53
3.6 Pics d'intensité	54
3.7 Bilan	58
4. DÉFINITION DE LA CHARGE D'ENTRAÎNEMENT EN SPORTS COLLECTIFS	60
4.1 Mesures internes	61
4.1.1 Mesures subjectives.....	61
4.1.2 Mesures objectives	63
4.2 Mesures externes.....	66
4.2.1 Mesures instantanées de la position	66
4.2.2 Mesures accélérométriques.....	68
4.3 Bilan	71

5 PÉRIODISATION DE LA CHARGE D'ENTRAÎNEMENT EN SPORT COLLECTIF	73
5.1 Organisation de l'entraînement en Handball	73
5.2 Les jeux réduits	76
5.2 L'enchaînement des matchs	79
5.3 Bilan	83
OBJECTIFS EXPERIMENTAUX	85
ÉTUDE 1 : VALIDITÉ DU SYSTÈME DE POSITIONNEMENT LOCAL À BANDE ULTRA-LARGE KINEXON™ POUR ÉVALUER LES MOUVEMENTS SPÉCIFIQUES AU HANDBALL	87
OBJECTIF DE L'ÉTUDE	88
MÉTHODOLOGIE	88
<i>Participants</i>	88
<i>Protocole expérimental</i>	88
<i>Matériel</i>	89
<i>Traitement des données</i>	91
<i>Analyse statistique</i>	92
RÉSULTATS	93
DISCUSSION	93
<i>Limites</i>	96
<i>Conclusion</i>	96
<i>Applications pratiques</i>	96
.....	97
ARTICLE.....	97
ÉTUDE 2 : INTENSITÉ LOCOMOTRICE MAXIMALE CHEZ LES JOUEURS DE HANDBALL D'ÉLITE : UN PREMIER APERÇU DES DIFFÉRENCES DE POSTES DE JEU ET DES PRATIQUES D'ENTRAÎNEMENT	104
OBJECTIF DE L'ÉTUDE	105
MÉTHODOLOGIE	105
<i>Approche expérimentale du problème</i>	105
<i>Participants</i>	106
<i>Protocole expérimental</i>	107
<i>Traitement des données</i>	108
<i>Analyse statistique</i>	109
RÉSULTATS.....	110
DISCUSSION	111
<i>Limites</i>	113
<i>Conclusion</i>	114

<i>Applications pratiques</i>	114
ARTICLE.....	115
ÉTUDE 3 : EFFET DE L'ENCOMBREMENT DU CALENDRIER SUR LA PÉRIODISATION DE LA CHARGE	
D'ENTRAÎNEMENT CHEZ LES JOUEURS DE HANDBALL ÉLITE	125
OBJECTIF DE L'ÉTUDE	126
MÉTHODOLOGIE	126
<i>Approche expérimentale du problème</i>	126
<i>Participants</i>	127
<i>Matériel</i>	128
<i>Traitement des données</i>	129
<i>Analyse statistique</i>	129
RÉSULTATS.....	130
DISCUSSION	130
<i>Limites</i>	132
<i>Conclusion</i>	133
<i>Applications pratiques</i>	133
ARTICLE.....	134
DISCUSSION GÉNÉRALE	156
APPORTS DES TRAVAUX EXPÉRIMENTAUX	156
<i>Système de suivi instantané de la position : validation du Kinexon™</i>	156
<i>Organisation et structuration des entraînements de Handball</i>	158
LIMITES ET CONSIDÉRATIONS MÉTHODOLOGIQUES	161
<i>Système de suivi instantané de la position : Kinexon™</i>	161
<i>Organisation et structuration des entraînements de Handball</i>	161
CONCLUSION GÉNÉRALE ET APPLICATIONS PRATIQUES	163
<i>Système de suivi instantané de la position : Kinexon™</i>	163
<i>Organisation et structuration des entraînements de Handball</i>	164
PERSPECTIVES DE RECHERCHES	165
<i>Organisation et structuration des entraînements de Handball</i>	165
BIBLIOGRAPHIE	167

Liste des Figures

Figure 1 : Représentation d'un terrain de Handball.....	24
Figure 2 : Description des postes en Handball.....	25
Figure 3 : Vitesse instantanée mesurée en sprint avec les systèmes Vicon (cercles noirs) et ClearSky (cercles blancs) avant filtrage (gauche) et après filtrage équivalent (droite), d'après Serpiello et al. (2018).....	35
Figure 4 : Graphique en boîte et moustaches avec les différences (m) des deux systèmes (UWB et GPS) dans les variables Gis Longueur et Gis Surface analysées lors de jeux réduits d'après Bastida-Castillo et al. (2019).....	36
Figure 5 : Exemple typique des signaux d'accélération (en $m \cdot s^{-2}$) en fonction du temps (en s) mesurés avec les accéléromètres MinimaxX situés dans le haut du dos (UB_{MXX}) et le bas du dos (LB_{MXX}) et avec le système de plateformes de force (COM_{PFF}) pendant les déplacements, d'après (Hollville, et al. 2021).	38
Figure 6 : Évolution de la répartition du temps de jeu en Handball.....	42
Figure 7 : $DTp \pm SD$ (en m) par poste d'après Šibila et al. (2004) et Luig et al. (2008).	44
Figure 8 : $DTp \pm SD$ (en m) par poste d'après Michalsik et al. (2016), Cardinale et al. (2017) et Machado et al. (2021).....	44
Figure 9 : $DTp \pm SD$ (en m) par postes, différenciés par latéralité, d'après Cardinale et al. (2017) et Machado et al. (2021).....	45
Figure 10 : $DTp \pm SD$ (en m) par type de déplacement selon Al-Lail et al. (2001) et Póvoas et al. (2012).	46
Figure 11 : Temps passé $\pm SD$ (en s) dans les différentes catégories de déplacements selon les postes d'après Póvoas et al. (2012).	47
Figure 12 : $DTp \pm SD$ (en m) dans les différentes catégories de déplacements selon les postes d'après Póvoas et al. (2012).	47

Figure 13 : Intensités de déplacements, DTp \pm SD (en m) par postes d'après Machado et al. (2021).	48
Figure 14 : DTp \pm SD (en m) durant les matchs selon les postes et leurs latéralités d'après Machado et al. (2021).	49
Figure 15 : Actions de Haute Intensité \pm SD (Nombre) d'après Póvoas et al. (2009) et Michalsik et al. (2015.c).	50
Figure 16 : Intensité de l'activité des joueurs selon leur poste, DTp par minutes \pm SD (en m \cdot min ⁻¹) d'après Šibila et al. (2004), Luig et al. (2008), Póvoas et al. (2009) et Michalsik et al. (2015.a).	54
Figure 17 : Intensité de l'activité, DTp par minutes \pm SD (en m \cdot min ⁻¹) des joueurs selon leur poste et leur latéralité d'après Cardinale et al. (2017) et Machado et al. (2021).	54
Figure 18 : Répartition de l'activité moyenne, DTp \pm SD par périodes de 5 minutes d'après Michalsik et al. (2015.b).	55
Figure 19 : Exemple d'analyse de loi de puissance modélisant la relation entre l'intensité de l'exercice d'après Delaney et al. (2015). À gauche : vitesse moyenne (m \cdot min ⁻¹) tracée pour chaque durée d'exercice moyenne mobile de 5 - 600 secondes. À droite : Régression logarithmique permettant d'obtenir une relation linéaire.	58
Figure 20 : Cadre théorique du processus d'entraînement d'après Impellizzeri et al. (2019).	61
Figure 21 : Échelle RPE de Borg (CR-10), d'après Borg (1987).	62
Figure 22 : Exemple de suivi de la CEe à partir des données de distance parcourue d'après Dubois et al. (2020).	67
Figure 23 : Exemple de suivi de la CEe à l'aide du PlayerLoad™ d'après Robineau et al. (2020).	70
Figure 24 : Syndrome Général d'Adaptation d'après Selye (1956).	75

Figure 25 : Résultats des tests pré- et post- période de matchs enchainés ; vitesse en sprint sur 17 m (Vert), sprint en courbe pour le « bon » côté (CSGS, Rouge), sprint en courbe pour le « mauvais » côté (CSWS, Bleu), vitesse en course en zigzag (Jaune), déficit de changement de direction (Orange), et puissance propulsive moyenne en demi-squat (HS MPP, Gris) ; d'après Freitas et al. (2021)..... 80

Figure 26 : Tacles et interceptions sur les 7 matches analysés (Moyenne \pm SD) ; † différence significative par rapport aux 1er et 7e matches ($p>0,05$) ; * différence significative par rapport aux 4e et 5e matches ($p>0,05$) ; TTI = Total des Tacles/interceptions ; STI = Tacles/interceptions réussis ; d'après Moreira et al. (2016). 81

Figure 27 : Mesures salivaires au repos, à jeun (moyenne \pm SD), a = différent de J1, b = différent de J2, c = différent de J3, d'après Moreira et al. (2016). 82

Figure 28 : Étude 1 : Figure 1. A: Position of the Vicon® camera on configuration for sprints (—); B: Position of the Vicon® camera on configuration for lateral and specific movements (— · —); C: Schematic position of the Kinexon™ antennas and position of testing zones on the field; D: Position of Kinexon™ antennas; E: Position of the Vicon® reflective marker on the Kinexon™ tag. 98

Figure 29 : Étude 1 : Figure 2. Synchronized position data of the two systems (Kinexon™ and Vicon®) both in the centre and on the side of the court, for each type of movements..... 99

Figure 30 : Étude 2 : Figure 1. Peak locomotor intensity during match, SSGs and HIIT as a function of each rolling average period for playing position. 119

Figure 31 : Étude 3 : Figure 1: Variables related to external and internal training load volume: TD, HS, AR, sRPE. The horizontal black line represents the mean, while the vertical black line represents \pm SD, and each grey point represents the data of a player during a training session. 152

Figure 32 : : Étude 3 : Figure 2: Variables related to external and internal training load intensity: TD/min, HS/min, AR/min, RPE. The horizontal black line represents the mean, while the vertical black line represents \pm SD, and each grey point represents the data of a player during a training session. 152

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Exemple de critères d'efficacité d'analyse vidéographique notationnelle d'après Lacome (2013).	27
Tableau 2 : Erreurs de position, de vitesse et d'accélération mesurées pour le parcours sportif (SSC) et les matchs de Football à effectif réduit (SSG). Pour chaque catégorie, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur absolue moyenne (MAE) ainsi que leur écart-type (SD) sont indiquées. CEP indique l'erreur de position médiane, CE95 le 95ème percentile des valeurs d'erreur ; d'après Blauburger et al. (2021).	37
Tableau 3 : Récapitulatif des DTp par postes selon les différentes études.	43
Tableau 4 : Pourcentage de Différence entre le LPS testé et le Système de Référence.	94
Tableau 5 : Étude 1 : Table I: Comparison of peak speed, peak acceleration, and peak deceleration between Kinexon™ and Vicon® during three different locomotion activities performed in the centre of an indoor court.	100
Tableau 6 : Étude 1 : Table II: Comparison of peak speed, peak acceleration, and peak deceleration between Kinexon™ and Vicon® during three different locomotion activities performed on the side of an indoor court.	101
Tableau 7 : Coefficients de Corrélation entre les données réelles et les modèles de loi de puissance.	110
Tableau 8 : Étude 2 : Table 1. Description of Small-sided games used the study.	117
Tableau 9 : : Étude 2 : Table 2. Peak locomotor intensity per position and locomotor variables. Data are presented as mean ± SD. † Difference from Back players. ‡ Difference from Pivots. Only effect sizes > 0.6 with likely chances (>75%) that the differences are true are reported.	119
Tableau 10 : Étude 2 : Table 3. Peak locomotor intensity comparisons between match and small-sided games. Intercepts and slopes are presented as mean ± SD. SEE stands for standard error of estimate.	120

Tableau 11 : Étude 2 : Matériel Supplémentaire, Table 1. Rolling Average during matches per position and locomotor variables. Data are presented as mean \pm SD.	122
Tableau 12 : Étude 2 : Matériel Supplémentaire, Table 2. Rolling Average during 6v6FF per position and locomotor variables. Data are presented as mean \pm SD.	123
Tableau 13 : Étude 2 : Matériel Supplémentaire, Table 3. Rolling Average during 6v6HF per position and locomotor variables. Data are presented as mean \pm SD.	123
Tableau 14 : Étude 2 : Matériel Supplémentaire, Table 4. Rolling Average during 4v4 per position and locomotor variables. Data are presented as mean \pm SD.	124
Tableau 15 : Étude 2 : Matériel Supplémentaire, Table 5. Rolling Average during HIIT per position and locomotor variables. Data are presented as mean \pm SD.	124
Tableau 16 : Description des schémas hebdomadaires analysés. Les jours de match sont mis en exergue en rouge, en noirs les entrainements non étudiés, en vert les Entrainements présentant une diminution du volume et de la charge d'entraînement, en bleu les entrainements équivalent en intensité et en volume et en blanc les entrainements sans caractéristique notable.....	130
Tableau 17 : Étude 3 : Table 1: Weekly turnover descriptions.	153
Tableau 18 : Étude 3 : Table 2: Descriptive and inferential statistics for MD-3. Number of * is for qualitative inference: * possibly, ** likely, *** very likely, and **** almost certain difference. SEE stands for standard error of estimate.	153
Tableau 19 : Étude 3 : Table 3: Descriptive and inferential statistics for MD-2. Number of * is for qualitative inference: * possibly, ** likely, *** very likely, and **** almost certain difference. SEE stands for standard error of estimate.	154
Tableau 20 : Étude 3 : Table 4: Descriptive and inferential statistics for MD-1. Number of * is for qualitative inference: * possibly, ** likely, *** very likely, and **** almost certain difference. SEE stands for standard error of estimate.	155

Liste des Abréviations

Par ordre alphabétique :

AFL :	Australian Football League (Ligue de Football Australien)
AID :	Ailier Droit
ALG :	Ailier Gauche
AR :	Accel'Rate
ArD :	Arrière Latéral Droit
ArG :	Arrière Latéral Gauche
CE :	Charge d'entraînement
CEe :	Charge d'entraînement externe
CEi :	Charge d'entraînement interne
CV :	Coefficient de Variation
DC :	Demi-Centre
DHV :	Distance à Haute Vitesse
DT :	Distance Totale
DTp :	Distance Totale parcourue
EHF :	European Handball Federation (Fédération Européenne de Handball)
FC :	Fréquence Cardiaque
FC _{max} :	Fréquence Cardiaque Maximale
GB :	Gardien de But
GPS :	Global Positioning System (Système de Positionnement Global)
HIIT :	High Intensity Interval Training (Entraînement par Intervalles de Haute Intensité)
IHF :	International Handball Federation (Fédération Internationale de Handball)
LPS :	Local Positioning System (Système de Positionnement Local)
P :	Pivot
r :	Coefficient de corrélation de Pearson
RPE :	Rating of Perceived Exertion (Évaluation de l'Effort Perçu)
sRPE :	Session Rating of Perceived Exertion (Évaluation de l'Effort Perçu sur la Séance)
SSGs :	Small Sided Games (Jeux Réduits)
TEE :	Typical Error of Estimate (Erreur Type d'Estimation / de Mesure)
UWB :	Ultrawideband (Bande Ultra-large)
$\dot{V}O_2$:	Consommation d'oxygène
$\dot{V}O_{2max}$:	Consommation maximale d'oxygène

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le Handball est un sport collectif professionnel et olympique (dans sa forme actuelle, depuis 1972) qui a connu une popularité croissante au cours des dernières décennies. À titre d'exemple, en janvier 2020, le Championnat d'Europe de Handball EHF EURO masculin a réuni 500 000 spectateurs au global et a été diffusé dans 175 pays pour une audience totale cumulée de 1,1 milliard de téléspectateurs. Son pendant féminin a quant à lui généré une audience TV cumulée de 574 millions de téléspectateurs dans près de 60 pays en décembre 2020. La fédération internationale de Handball (IHF) a maintenant répertorié environ 20 millions de joueurs dans le monde. En Europe, les ligues professionnelles sont présentes dans plus de 15 pays (Allemagne, Espagne, France, Croatie, Serbie, Danemark), avec plus de 200 joueurs employés par ligue.

L'organisation actuelle du Handball de compétition en fait un sport d'équipe de haute intensité avec une forte dimension physique notamment du fait des nombreux contacts corporels entre les joueurs. La pratique de ce sport met particulièrement l'accent sur la course en général et le sprint en particulier, mais aussi sur le saut et le tir. C'est pourquoi ce sport requiert une combinaison de capacités aérobies et anaérobies pour être performant. Les études portant sur des sports d'équipe intermittents ont mis en évidence que la performance des joueurs est dépendante à la fois de leur agilité et de leur puissance (vitesse et force). D'ailleurs, la capacité des joueurs à performer dans les sports intermittents est plus spécifiquement liée à leur aptitude à répéter des efforts courts de haute intensité tout au long du match qu'à celle de maintenir un rythme d'exercice sous-maximal mais constant (Aughey 2011b, Bradley, et al. 2011, Couderc, et al. 2019, Harper, et al. 2019, Pernigoni, et al. 2021).

Par son développement récent, et sa professionnalisation, le nombre de matchs joués dans une saison de Handball au niveau élite, et l'intensité à laquelle ceux-ci sont pratiqués ont augmenté parallèlement et de façon tout à fait notable. La conjugaison de ces deux évolutions rend nécessaire l'organisation de la préparation physique et de la récupération de manière optimale afin de permettre aux joueurs professionnels de maintenir leur niveau de performance tout au long de la saison. Dans ce contexte, la recherche en physiologie appliquée au Handball s'est considérablement développée au cours des quinze dernières années, en particulier en ce qui concerne l'activité des joueurs durant les matchs et les entraînements. L'évolution des

technologies de mesure de l'activité a en effet, permis de mettre au point des systèmes de positionnement locaux (LPS, Local Positioning System) portables offrant la possibilité d'étudier les exigences physiques dans différents sports d'équipe de salle, comme ce fut le cas auparavant dans les sports d'équipe d'extérieur, à l'aide de GPS (Global Positioning System). Ces dispositifs facilitent l'analyse détaillée des mouvements et offrent une alternative au codage vidéo, long et fastidieux.

La recherche dans de nombreux sports d'équipe a déjà intégré l'utilisation du GPS ou du LPS, comme dans le Football, le Rugby ou le Basketball, mais le Handball n'en est qu'aux prémices de ces analyses. Les études consacrées à l'analyse de la tâche lors de compétitions en Handball quantifient pour chaque joueur la Distance Totale parcourue (DTp), ainsi que la distance, la durée et la fréquence d'activité dans des zones d'intensité différentes. Ces études ont permis de mettre en évidence la nature intermittente de l'activité mais également la spécificité par poste. La compréhension des exigences techniques et physiques du jeu est essentielle pour la connaissance de l'activité, elle-même nécessaire à la conception d'exercices d'entraînement spécifiques au Handball chez les joueurs professionnels.

Toutefois, les études actuelles présentent plusieurs limites :

1. Les technologies utilisées pour mesurer l'activité des joueurs de Handball en match et en entraînement n'ont été que partiellement étudiées. En effet, bien que l'offre technologique se diversifie, notamment avec l'arrivée des LPS, leur validité et leur reproductibilité n'est pas pour autant toujours assurée et mérite donc d'être testée.
2. Bien qu'un certain nombre d'études présentent l'activité des joueurs de Handball durant les matchs, elles s'attardent encore trop généralement sur le volume d'activité des joueurs et ne permettent donc pas encore de comprendre les variations d'intensité de cette activité, inhérente à sa nature intermittente.
3. Enfin, en dehors des études sur l'activité de match et d'entraînement, aucune n'a, à ce jour, porté sur la dynamique de charge d'entraînement (CE) en Handball. Il n'est donc pas encore possible de comprendre dans quelle mesure l'activité des joueurs durant les entraînements est la plus adaptée possible pour leur permettre de performer durant les

matches. De plus cela ne permet pas de savoir dans quelle mesure l'activité des joueurs est adaptée en fonction du rythme des matches.

Le but de cette thèse est donc d'améliorer notre compréhension des exigences physiologiques et locomotrices des matches et des entraînements typiques de Handball, au niveau élite, en utilisant une nouvelle technologie de suivi des joueurs. Plus précisément, ce travail aura pour premier objectif d'examiner la validité d'un nouveau système de suivi des joueurs en salle (Kinexon™, Kinexon GMBH, Munich, Germany). À partir de cette connaissance établie des capacités de l'outil de mesure, nous chercherons à caractériser les exigences locomotrices maximale en match, selon les postes, dans le Handball d'élite. Nous comparerons également ces exigences locomotrices maximales de matches à celles produites lors des jeux réduits classique d'entraînements. Enfin, nous nous attacherons à décrire la périodisation de la CE au Handball élite, en fonction du type de microcycle, selon le rythme des matches hebdomadaire.

Ce manuscrit se compose de trois chapitres principaux. Le premier est consacré à une revue de littérature relative aux outils de quantification de l'activité sportive, à l'analyse de l'activité Handball lors des compétitions élites et finalement à la gestion de la CE et à l'organisations des entraînements en sports collectifs. Dans le second chapitre, nous présenterons les trois études réalisées dans le cadre de ce travail de thèse. Enfin, dans un dernier chapitre, nous discuterons de manière générale les apports scientifiques de nos recherches.

REVUE DE LITTÉRATURE

Cette revue de littérature sera organisée en cinq parties. La première concernera la définition du Handball, activité support de cette thèse, et chacune des trois suivantes aura pour but de présenter l'étendue des connaissances concernant un aspect spécifique de ce travail de recherche. Ainsi, après la présentation de l'activité Handball, nous analyserons les outils permettant une quantification de l'activité sportive que cela soit en match ou en entraînement, et leur évolution, de l'analyse vidéographique manuelle aux systèmes de localisation locale. À la suite de cette partie nous chercherons à mieux comprendre l'étendue des connaissances sur l'activité des joueurs de Handball lors des compétitions élités à la fois en termes de volume et d'intensité d'activité. Les deux dernières parties seront respectivement consacrées à la mesure de la CE en sports collectifs et à sa gestion notamment autour de la question de la périodisation des entraînements.

1 L'ACTIVITÉ HANDBALL

Les origines du Handball sont à chercher du côté du Danemark à la toute fin du XIX^{ème} siècle lorsque le danois Holger Nielsen créa les premières règles du Handball moderne (appelé alors håndbold) en 1898. Vingt ans plus tard, en 1919, en Allemagne, le professeur Carl Schelenz, de l'École normale germanique d'éducation physique de Leipzig, proposa une adaptation du torball (un jeu pratiqué par les femmes allemandes) et définit les principes du Handball à onze. Cette forme de Handball, se jouant en extérieur sur un terrain de Football, à 11 joueurs contre 11, est officiellement reconnue comme sport en 1926 lorsque la Fédération Internationale d'Athlétisme nomme une commission en charge d'établir un règlement sportif pour la pratique du « Jeu à la main ». Par la suite, en 1928, la Fédération Internationale de Handball Amateur est créée permettant à la discipline d'apparaître en tant que sport de démonstration aux Jeux Olympiques d'Amsterdam de la même année et de devenir une discipline Olympique à part entière dès les Jeux de Berlin en 1936, sous sa forme à 11 contre 11 en extérieur. Les premiers championnats du monde ont lieu en 1938 en Allemagne et confrontent 4 équipes européennes (Allemagne, Autriche, Danemark, Suède). Dans le cas de la France, le Handball reste anecdotique jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, mais le régime de Vichy aide à la création d'une fédération française de Handball autonome et introduit l'activité dans les programmes du

sport scolaire. Au sortir de la guerre, en 1946, huit fédérations nationales, dont la France, fondent la Fédération Internationale de Handball. Dès les années 1950-1960, la version actuelle du Handball, se jouant à 7 joueurs contre 7 prend de plus en plus d'importance, notamment avec le premier championnat du monde en Suède en 1954. En 1966 a lieu le dernier championnat du monde de Handball à 11 et l'activité investit de plus en plus les gymnases même si certaines compétitions continuent de se jouer en extérieur. Le Handball, tel que nous le connaissons aujourd'hui, pratiquée à 7 contre 7 en intérieur, a ensuite connu une popularité croissante pour finalement faire son apparition aux Jeux Olympiques en 1972 pour les hommes et 1976 pour les femmes marquant ainsi la concrétisation de son développement européen et international. Toutefois, en France, le Handball a longtemps été considéré comme une activité de complément servant à maintenir une activité durant la saison hivernale lorsque les sports d'extérieurs ne pouvaient plus être pratiqués. Pour autant, l'importance prise par l'activité dans le milieu scolaire et universitaire a permis son développement rapide jusqu'à ce qu'il devienne un sport pleinement professionnel en 2007. Aujourd'hui, le Handball représente la 6ème fédération sportive française en termes d'effectifs tous sports confondus et la 3ème fédération de sport collectif derrière le Football et le Basketball. Les performances des équipes nationales, féminines comme masculines réalisées depuis plus d'une décennie et de nouveau confirmées par les deux titres olympiques lors des Jeux d'été de Tokyo, conjointement à une forte médiatisation, participent sans doute de la popularité et de l'engouement croissant pour ce sport.

Le Handball actuel consiste en une opposition de 2 équipes, médiée par un ballon manipulable uniquement avec les mains, sur un terrain de 40m de long par 20m de large (cf. Figure 1). Le temps de jeu officiel est de 60 minutes effectives, réparti en 2 périodes de 30 minutes entrecoupées de 15 minutes de pause. Pour remporter la victoire, chacune des deux équipes cherche à marquer plus de buts que l'adversaire. Dans ce cadre, la pratique actuelle du Handball est spécifique en trois points. Tout d'abord le nombre de remplacements de joueurs au cours d'un match est illimité, et depuis les Jeux Olympique de Rio 2016, il est possible de remplacer le gardien par un joueur de champ, ce qui offre la possibilité de jouer en supériorité numérique. Cela fait de la gestion de l'effectif un élément clé des matchs mais aussi des saisons. De plus, depuis l'année 2000, l'engagement après un but, peut se faire sans attendre que l'ensemble des joueurs de l'équipe adverse ait regagné leur moitié de terrain. L'introduction de cette règle a accentué la notion de jeu de transition au Handball puisque les joueurs passent sans cesse, et très rapidement, du statut d'attaquant à celui de défenseur. Enfin, la dernière spécificité du

Handball relève de ses actions prépondérantes, à savoir les passes, les tirs et les duels offensifs et défensifs qui exigent des qualités physiques de force et de puissance ainsi que de vitesse et d'endurance (Gorostiaga, et al. 2006).

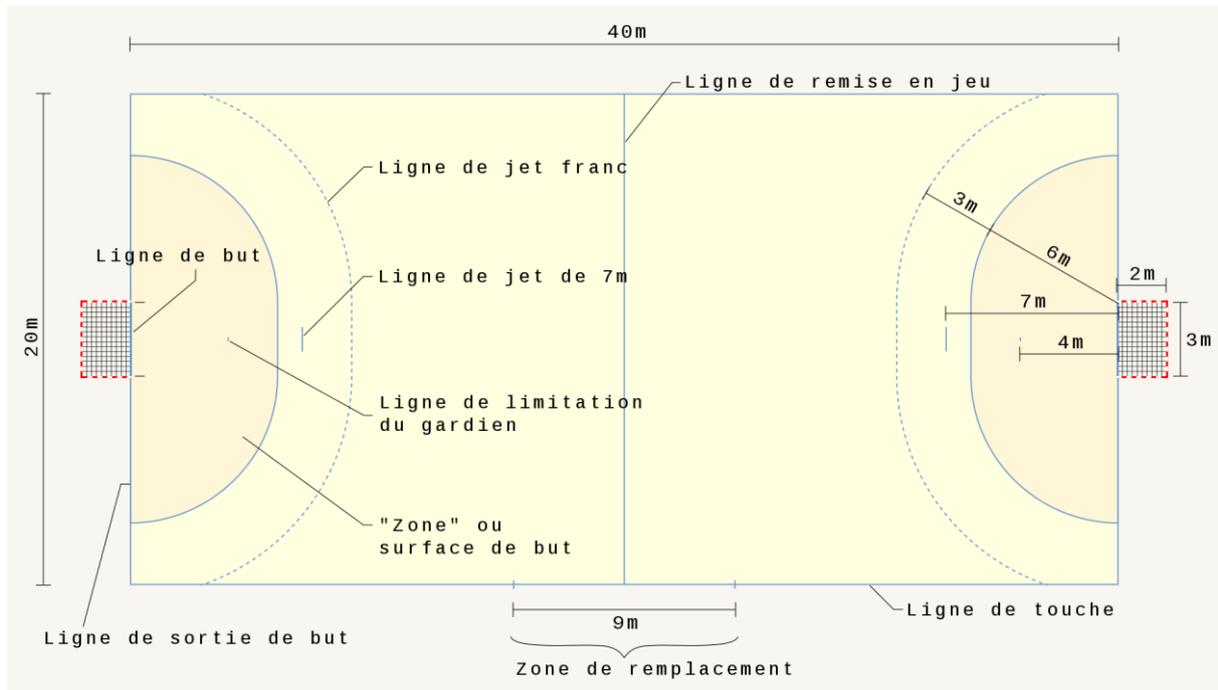


Figure 1 : Représentation d'un terrain de Handball.

Une équipe est composée de 7 joueurs sur le terrain et de 9 remplaçants, chacun évoluant à un poste précis. Ces postes se divisent en trois groupes en attaque et se répartissent en numéros en défense (cf. Figure 2) :

- Une base arrière constituée de trois joueurs : 1 arrière latéral droit (ArD), 1 arrière latéral gauche (ArG) et 1 demi-centre (DC), le plus souvent meneur de jeu. Dans le Handball d'aujourd'hui, ce dernier se transforme de plus en plus souvent en un arrière central pouvant permuter facilement avec les deux arrières latéraux.
- Une base avant également constituée de trois joueurs : 1 ailier droit (AID), 1 ailier gauche (AIG), se positionnant dans les angles du terrain et 1 pivot (P) positionné au sein de la défense adverse.
- Un gardien de but (GB), isolé dans une zone qui lui est réservée, complète l'équipe. Il est le seul joueur à pouvoir toucher le ballon avec ses pieds, du moment qu'il reste dans sa zone dédiée.

- Les défenseurs extérieurs sont appelés les numéros 1, puis en se rapprochant du centre du terrain se trouvent les numéros 2 et enfin les deux défenseurs centraux sont appelés les numéros 3. Ces derniers peuvent être distingués en numéros 3 bas et 3 haut dans le cas de défenses étagées avec un joueur évoluant devant les 5 autres.

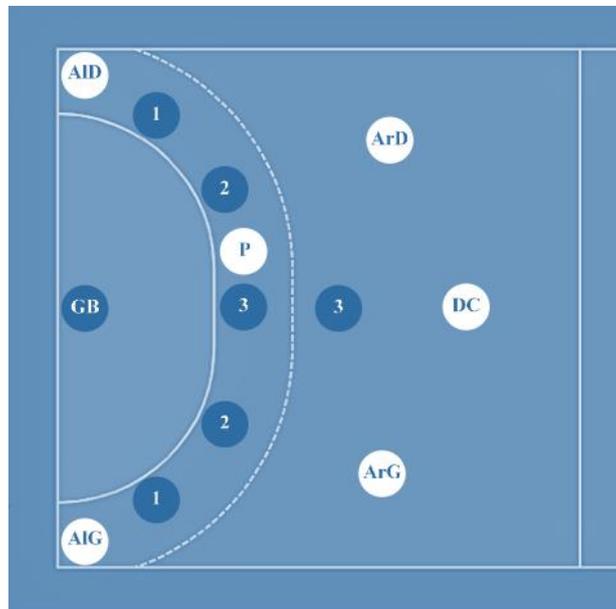


Figure 2 : Description des postes en Handball.

Ainsi la formation et l'entraînement des joueurs de Handball ont pour but de les préparer, à travers l'acquisition de compétences technico-tactiques et l'amélioration de leurs capacités physiques, à performer spécifiquement à un poste. Toutefois, l'évolution du Handball, notamment sa professionnalisation, amène les joueurs à être de plus en plus performants et à être polyvalents sur différents postes. Cela offre de nouvelles opportunités tactiques et stratégiques pour les équipes avec la possibilité de construire leur jeu en organisant des changements de postes entre certains joueurs. Ainsi, il est de plus en plus fréquent d'organiser les trois joueurs de la base arrière sans un demi-centre spécifique ni des arrières totalement latéralisés mais plutôt sous la forme de trois joueurs pouvant évoluer ponctuellement à chacun des trois postes. De même, il n'est plus rare aujourd'hui de voir des joueurs, ailier de formation, jouer au poste d'arrière latéral. Néanmoins, afin de rendre ces permutations les plus efficaces possibles, il est nécessaire que les entraîneurs et les préparateurs physiques puissent avoir la meilleure connaissance possible à la fois des exigences des différents postes et des capacités des joueurs. Ce n'est qu'à cette condition qu'il sera possible de mettre en place des projets de jeu en adéquation avec le potentiel de l'équipe, et donc d'obtenir les meilleures performances

individuelles et collectives possibles. C'est pourquoi, il est nécessaire de maîtriser des outils permettant d'appréhender le plus précisément possible l'activité réelle des joueurs en matchs selon leur poste mais aussi celle produite en entraînement.

2. OUTILS DE QUANTIFICATION DE L'ACTIVITÉ

Afin de pouvoir améliorer les performances des athlètes, il est important de bien comprendre l'activité sportive pratiquée et d'en établir les exigences physiques, quelle que soit la discipline. Cela est d'autant plus vrai lorsqu'il s'agit de sports collectifs pour lesquels l'activité diffère selon les postes.

Depuis un peu plus de soixante-dix ans maintenant, les encadrements techniques des équipes professionnelles de sports collectifs sont à la recherche de solutions permettant d'obtenir, le plus précisément possible, une mesure de l'activité physique individuelle des joueurs durant les compétitions. Les avancées technologiques ont permis de faire émerger différentes solutions, depuis l'analyse vidéo manuelle aux systèmes de mesure de position instantanée, et chacune d'entre-elles ont été plus ou moins étudiées et/ou exploitées en Handball. En effet, ce sport est relativement récent dans sa forme actuelle avec une cinquantaine d'année d'existence officielle et une professionnalisation datant de moins de 20 ans. Il n'est donc pas étonnant de constater que la littérature scientifique portant sur ce sport est bien moins dense (1309 résultats sur PubMed) que pour d'autres sports comme le Football (29704 résultats sur PubMed) ou le Rugby (15627 résultats sur PubMed), tous sujets de recherches confondus. D'ailleurs le Handball ne fait effectivement l'objet d'étude sur ses exigences physiques en compétition que depuis le début des années 2000, et ce, de manière parcimonieuse, même si une certaine augmentation des publications scientifiques est à noter ces dernières années. Nous n'avons, en effet, recensé que 8 études entre 2001 et 2013 (Al-Lail 2001, Chelly, et al. 2011, Dott 2002, Luig P. 2008, Michalsik, et al. 2013, Pori 2003, Šibila 2004, Tanaka, et al. 2002) et 9 études entre 2014 et 2019 (Cardinale, et al. 2017, Karcher and Buchheit 2014, Kniubaite, et al. 2019, Luteberget and Spencer 2017, Michalsik, et al. 2014, 2015, Póvoas 2014, Wagner, et al. 2018, Wik, et al. 2017) portant sur les exigences physiques de la compétition en Handball. La plupart de ces études sont basées sur des enregistrements vidéographiques, analysés avec diverses méthodes mais les études les plus récentes utilisent des systèmes LPS en s'appuyant sur les méthodes ayant fait leurs preuves dans le Football et/ou le Rugby avec les GPS et adaptées au Handball.

2.1 L'Analyse vidéographique

Historiquement, les premières analyses de l'activité des joueurs en situation de compétition ont été effectuées à l'aide d'analyses vidéo avant d'être supplantées, dans certains sports, par des analyses de données GPS ou LPS. Le Handball ne fait pas exception à cette logique puisque la majorité des études de quantification de l'activité des joueurs de Handball en compétition ont été menées avec ces technologies, et seules les études de ces cinq dernières années se sont appuyées sur les solutions LPS. Bien que nous n'ayons pas travaillé sur ces technologies, il nous semble important de présenter leur fonctionnement afin de mieux comprendre les résultats de ces études.

2.1.1 Analyse par notation

L'analyse vidéographique notationnelle est historiquement la toute première méthode de suivi de l'activité des joueurs en compétition à avoir vu le jour. Il s'agit d'un procédé permettant de définir des critères d'efficacité de la performance mais ceux-ci sont construits de manière subjective ce qui ne la rend pas généralisable (cf. Tableau 1).

Catégorie	Description
Marche	Marche en avant ou en arrière, doucement. Un pied est toujours en contact avec le sol.
Jogging	Courir en avant doucement, afin de changer de position.
Course à haute vitesse	Courir avec un but manifeste et avec effort, accélérant avec de longues foulées, mais pas de manière maximale.
Sprint	Course dont l'effort est maximal, avec des mouvements de bras amples et des mouvements de tête.

Tableau 1 : Exemple de critères d'efficacité d'analyse vidéographique notationnelle d'après Lacomme (2013).

La plus ancienne référence, à notre connaissance, faisant état de cette méthode d'analyse remonte à l'étude effectuée par Winterbottom W. en 1952 portant sur le Football professionnel anglais (Winterbottom 1952). Toutefois, ce type d'analyse n'a pas été souvent reproduite dans le cadre d'étude scientifique jusqu'à ce qu'en 1976, Reilly et Thomas proposent une solution permettant d'optimiser cette méthode d'analyse de la tâche en sport collectif, en la rendant plus objective (Reilly 1976). Leur travail, qui portait aussi sur des données de Football professionnel anglais, consistait à utiliser une reproduction du terrain codifiée par zone afin d'estimer les positions et les distances parcourues par les joueurs. L'activité de chacun des joueurs devait

ensuite être codée subjectivement à partir de l'analyse vidéo du match puis chacune des périodes d'activités de chacun des joueurs devait être chronométrée, ce qui rendait évidemment l'analyse très chronophage.

Par la suite, les avancées technologiques en informatique ont permis d'optimiser ce type d'analyse, notamment en offrant la possibilité d'effectuer le séquençage des événements directement lors de l'enregistrement vidéo ou à posteriori. Malgré cela, Duthie et al. (2003) ont mis en évidence une problématique majeure de cette méthode, à savoir la faible reproductibilité des mesures effectuées. En effet, en demandant à un même opérateur de réaliser deux fois l'analyse d'un même match de Rugby à un mois d'intervalle, les auteurs ont conclu que cette méthode d'analyse ne peut être considérée que comme modérément reproductible pour l'étude de l'activité physique en Rugby. Cette étude a mis en évidence une reproductibilité des mesures pauvre à modérée, que cela concerne la durée moyenne des mouvements (7.1 – 9.3 % Typical Error of Measurement pour erreur type de mesure, TEE), le calcul du temps passé dans les différentes catégories d'intensité (5.8 - 11.1 % TEE), ou le nombre d'actions discrètes (4.3 - 13.6 % TEE), toujours par catégories d'intensité. C'est pourquoi cette méthode est aujourd'hui très peu utilisée dans le cadre de la quantification de l'activité physique en sport collectif en compétition ou en entraînement. D'autres technologies d'analyses, en partie automatisées, ont été mises au point dans l'objectif de quantifier, en temps réel ou presque, l'activité physique des joueurs lors des compétitions et/ou des entraînements.

2.1.2 Les méthodes de suivi semi-automatique

Les évolutions technologiques en informatique ont permis de passer d'une analyse manuelle à des analyses automatisées. Ceci permet à la fois de supprimer la problématique de la subjectivité des analyses et d'améliorer à la fois la précision, la validité et la reproductibilité des mesures (Dawson, et al. 2004, Roberts, et al. 2008). De ce fait, les technologies de suivi semi-automatique sont à présent très largement utilisées pour détailler la nature et le nombre des actions de chacun des joueurs individuellement, en sport collectif. D'ailleurs, les progrès réalisés dans ces technologies permettent des mesures très fines de l'activité physique individuelle des joueurs tant en situation de match que d'entraînement (Carrilho, et al. 2020, Linke, et al. 2020). Ceci a favorisé la création de nombreux outils de ce type tel que Second Spectrum (Los Angeles, USA), Track160 (Israël), ReSpo.Vision (Varsovie, Pologne),

SportsCode Game Breaker (Sportstec, Australie), Inmotio (Zeist, Hollande), Digital Soccer (Italie), Game Breaker (Sportstec, Australie) Utilius VS (CCC-Software, Allemagne) ou encore Dartfish (Fribourg, Suisse) qui est largement utilisé dans le Handball. Ces outils bien qu'étant en mesure de caractériser l'activité des joueurs sur le terrain, sont essentiellement utilisés dans le cadre de l'analyse technico-tactique. Ce travail est rendu possible par la catégorisation des actions en temps réel, à partir de la vidéo à l'aide de touches préalablement définies, ce qui en fait une solution efficace et peu coûteuse en matériel. Pour être opérationnel, ces systèmes de suivi semi-automatique de l'activité physique s'appuient sur plusieurs caméras disposées autour de l'espace de jeu servant à assurer un suivi dit « passif » des joueurs, car sans marqueurs. Cependant ils nécessitent une intervention humaine pour identifier initialement chacun d'eux. Le nombre de ces caméras, ainsi que leur positionnement dépendent à la fois du lieu et du sport (Barris and Button 2008). Le suivi des joueurs est rendu possible par une calibration préalable du système permettant de créer un plan bidimensionnel (coordonnées x, y) du terrain dans lequel les sportifs évoluent ainsi que le suivi de leurs trajectoires. Toutefois, ce dernier point reste problématique malgré l'intégration de technologies de reconnaissance optique de la couleur, du numéro du maillot et de prédiction des trajectoires de courses aux logiciels de traitement des images. En effet, des phénomènes d'occlusions peuvent apparaître lorsque les joueurs sont trop proches les uns des autres dans un petit périmètre, ce qui fait perdre l'identification des joueurs au système et rend nécessaire une intervention humaine pour y remédier.

Dans le cadre spécifique de l'analyse de l'activité Handball, deux principaux outils ont été utilisés lors de précédentes études. Tout d'abord le système SAGIT (Sagit system, Ljubljana, Slovénie), créé par une entreprise américaine et développé par Perš et collaborateurs à partir de 2002, qui s'appuie sur deux caméras, chacune placée à la verticale d'une moitié de terrain, et un logiciel de traitement des données. Le second système, utilisé pour la première fois en 2015 lors des championnats du monde de Handball au Qatar, est une adaptation du système Prozone® pour le Handball dénommé Prozone®Handball V.1.2 (Prozone, Leeds, Angleterre). Ce dernier s'appuie sur 3 caméras indépendantes (Baumer TXG13c) qui assurent le suivi des trajectoires et des différents événements du match pour l'ensemble des joueurs présents sur le terrain. Bien qu'ils aient été grandement exploités dans le but de quantifier l'activité des joueurs de Handball en compétition, ces deux outils ne sont pas utilisables pour effectuer un suivi quotidien de l'activité des joueurs de Handball, que ce soit en entraînement ou en match. En effet, l'outil

SAGIT n'est pas commercialisé et son utilisation à des fins scientifiques est extrêmement compliquée en raison de la complexité du recueil des informations et de la nécessité de se déplacer régulièrement en Slovénie afin d'analyser les données. De même, la technologie Prozone®Handball n'est pas non plus commercialisée car elle est encore en développement. Il est donc nécessaire de rechercher d'autres solutions pour effectuer un suivi quotidien de l'activité physique des joueurs de Handball, à l'entraînement et en compétition.

Par ailleurs, d'autres solutions vidéographiques semi-automatiques ont été mises au point, tels que les systèmes de capture du mouvement basés sur des caméras infrarouges et des marqueurs passifs portés par les sujets. Ces systèmes, bien qu'ayant été démontrés comme étant particulièrement efficaces pour mesurer précisément l'activité des joueurs (Chiari, et al. 2005, Jensenius, et al. 2012, Merriault, et al. 2017, Windolf, et al. 2008) restent trop lourds à utiliser au quotidien pour décrire et suivre l'activité des athlètes. Les sports collectifs présentent également le problème des contacts entre les joueurs qui limitent l'utilisation de ces outils. En effet, les marqueurs passifs portés par les sujets lors des sessions d'enregistrement sont placés sur le corps des sujets et doivent rester visibles d'au moins deux caméras simultanément pour pouvoir en mesurer la position instantanée. Or, lors des contacts, d'une part il n'est plus possible de conserver cette double visibilité mais la présence même des capteurs peut être source de risques pour les sujets. Ainsi, malgré la validité assurée des mesures de ces outils, ceux-ci ne sont pas exploitables pour la quantification de l'activité des joueurs de sport collectif durant les matchs et les entraînements.

2.2 Les outils GPS & LPS

Les outils de mesure de l'activité physique en sport collectif basés sur la technologie GPS ont commencé à apparaître au début du XXIème siècle mais leur utilisation restait cantonnée aux sports d'extérieur du fait de leur principe de fonctionnement. Il aura fallu attendre la fin des années 2010 pour que des solutions technologiques adaptent les procédés des GPS aux installations intérieures à travers les LPS. C'est pourquoi nous commencerons par détailler le fonctionnement des GPS avant de préciser les spécificités des technologies LPS.

2.2.1 Principe de fonctionnement

Bien que nous n'utilisions pas le système GPS dans le cadre de cette thèse, il nous paraît important de décrire son principe de fonctionnement puisque certains aspects sont communs avec ceux des LPS. Aujourd'hui la technologie GPS/LPS est certainement la solution la plus répandue en sport collectif pour mesurer la position instantanée des joueurs en compétition et/ou à l'entraînement. Cela est notamment dû au fait qu'elle permet une mesure l'activité des joueurs sans pour autant entraver leur pratique de l'activité, ce qui est un avantage en comparaison avec les autres technologies citées précédemment.

La problématique des sports de salle tels que le Handball est que les données quantitatives recueillies d'une manière scientifique pendant l'activité sont limitées par l'environnement fermé des gymnases. En effet, la qualité des mesures GPS est principalement dépendante de la qualité du signal reliant les balises sur Terre aux satellites en orbite, or celui-ci est presque inexistant une fois à l'intérieur d'un bâtiment (Butte, et al. 2012, Malone, et al. 2017, Rainham, et al. 2008, Witte and Wilson 2004). Pour fonctionner, ces systèmes GPS ont besoin d'établir une connexion entre une balise relais, positionnée à proximité des balises GPS individuelles portées par les joueurs et servant à la synchronisation des signaux de ceux-ci, et les satellites en orbites géostationnaires. Ainsi cette technologie GPS ne peut être exploitée en intérieur du fait de l'impossibilité de communiquer avec les satellites sous un toit. Afin de palier à cette incapacité de nombreuses autres solutions technologiques sont désormais disponibles pour surveiller les mouvements des joueurs. Toutefois, nombre d'entre elles (l'identification par radiofréquence, le réseau local sans fil ou Bluetooth) ne sont malheureusement pas adaptées à la mesure de la position en sport collectif en raison d'un manque de précision, d'instabilité ou de problèmes d'interférences. Récemment, de nouveaux outils, les systèmes de positionnement local (LPS) basés sur la technologie à bande ultra-large (UWB) ont été développés, permettant le suivi de la position des joueurs de sport collectif en l'intérieur. Dans le cadre des LPS, les satellites sont remplacés par des antennes placées autour du terrain. Ces dernières permettent alors de déterminer un espace délimité dans lequel la position des capteurs individuels peut être mesurée. C'est pourquoi l'on parle de positionnement local, en comparaison au positionnement global des GPS, pour lesquels tout lieu extérieur est susceptible de pouvoir servir d'espace de mesure. Le fonctionnement est, en dehors de cela, identique entre les GPS et les LPS, puisqu'un minimum de quatre récepteurs (antennes pour les LPS, satellites pour les GPS) est nécessaire

pour établir une mesure précise de la position des différentes balises individuelles : trois pour la position et une pour la synchronisation (Aughey 2011a, Larsson 2003). Afin de mesurer précisément cette position, le principe est de calculer le temps nécessaire au signal émis pour parcourir le trajet aller-retour entre l'émetteur et le récepteur. Puisque la vitesse de l'onde émise est connue, il est possible de connaître la position par simple intégration. De même il est possible de mesurer la vitesse de déplacement à partir de l'effet Doppler, en mesurant le décalage de fréquence d'une onde observé entre son émission et sa réception. Ce décalage se crée dès lors que la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps. Puisque la fréquence de l'onde émise est connue, il est possible de mesurer la vitesse de déplacement du récepteur en comparant la fréquence de l'onde reçue avec celle de l'onde émise. Cette solution est plus précise que de diviser la distance entre deux positions connues par le temps mis pour parcourir cette distance, c'est pourquoi la très grande majorité des systèmes GPS/LPS la privilégie aujourd'hui. Ainsi la précision d'un tel système peut se caractériser par sa capacité à mesurer la position et la vitesse.

Bien que la diversité des actions des sports collectifs rende complexe l'analyse des différents efforts inhérents à l'activité en match et en entraînement, les micro-technologies, et en particulier les GPS/LPS, permettent de quantifier et de qualifier les différents déplacements et/ou actions lors des différentes sessions. Pour cela, les balises sont portées dans le dos entre les scapulas à l'aide d'une brassière ajustée au corps afin de limiter les mouvements parasites. Ces balises contiennent différents capteurs tels que des accéléromètres triaxiaux, des gyroscopes, des magnétomètres et des systèmes de positionnement 3D. L'objectif conjoint à l'ensemble de ces outils est d'assurer à chaque instant la mesure et la transmission de la position et de l'orientation de la balise. À l'aide de ces dispositifs il est alors possible de déterminer la DTp, la distance parcourue à différentes vitesses (i.e., haute intensité > 14,5 km·h⁻¹, très haute intensité > 19,8 km·h⁻¹). Ce choix de palier de vitesse est le plus répandu dans la littérature scientifique pour étudier l'activité des joueurs, notamment en Football (Castellano, et al. 2014, Di Mascio and Bradley 2013). Ces paliers de vitesses présentent également l'avantage de pouvoir être comparés avec la grande majorité des études sur le Handball bien que dans ce sport aucun consensus n'ait pour le moment été fait sur les paliers de vitesse à utiliser (Karcher and Buchheit 2014). Il est également possible de mesurer le nombre et l'intensité des accélérations, décélérations et des impacts, les différentes vitesses en fonction des déplacements ainsi que le nombre et la durée des sprints, tout comme le pourcentage de temps passé dans différentes

zones d'effort. Ces données permettent de comparer l'activité en compétition et à l'entraînement, et d'analyser les différences existantes en fonction des postes (Izzo, et al. 2018). Il est important de préciser que l'intensité des déplacements à laquelle nous nous référons correspond à la vitesse des déplacements comme précisé ci-avant (i.e., haute intensité > 14,5 km·h⁻¹, très haute intensité > 19,8 km·h⁻¹). De même lorsque nous discutons de l'intensité des accélérations et décélérations, cela correspond aux différentes valeurs de ces paramètres. Cela correspond donc, dans les deux cas, à la définition de l'intensité donnée par les dictionnaires puisqu'il s'agit de la magnitude d'une quantité (ici la distance en mètre ou en kilomètre) par unité de temps (ici la seconde ou l'heure).

Aujourd'hui la grande majorité des GPS et LPS commercialisés pour mesurer l'activité physique en sport collectif sont multi-capteurs avec des accéléromètres triaxiaux, des gyroscopes et des magnétomètres. Cet ensemble permet la mesure d'autres paramètres représentatifs de l'activité physique des joueurs sur le terrain. L'ajout de ces accéléromètres permettent alors de mesurer de nouveaux paramètres permettant d'affiner l'analyse de l'activité. Notamment, l'accéléromètre intégré dans la balise GPS ou LPS permet de recueillir les accélérations du joueurs mesurés au niveau des scapulas. Ainsi il est possible d'enregistrer le mouvement selon les trois axes de l'espace et d'obtenir des indications sur la fréquence, la durée et l'intensité de l'activité physique étudiée (Chen and Bassett 2005, Corder, et al. 2008, Kavanagh and Menz 2008). Cette capacité à mesurer les accélérations selon les trois axes de l'espace a développé l'utilisation des accéléromètres dans le domaine de la recherche scientifique de manière exponentielle depuis la fin des années quatre-vingt (Bassett, et al. 2015) mais en a aussi fait le capteur de mouvement le plus utilisé pour l'évaluation de l'activité physique (Chen, et al. 2012). Parmi ces nouveaux paramètres, le plus répandu est celui mesurant la CE individuelle au cours de l'exercice. Cette nouvelle variable permet d'approfondir l'analyse de l'activité, en s'appuyant sur la somme des variations instantanées d'accélération selon les trois axes de l'espace. Cela permet de mieux appréhender les exigences de l'activité en renseignant sur l'activité des joueurs en dehors de leurs déplacements. Nous détaillerons ce processus dans une partie ultérieure (cf. 4.2.2 Mesures accélérométriques)

2.2.2 Validité et Reproductibilité de la mesure

La validité des systèmes GPS utilisés dans l'analyse de l'activité en sport collectif a fait l'objet de nombreuses études durant les dix dernières années (Akenhead, et al. 2014, Beato, et al. 2018, Coutts and Duffield 2010, Gray, et al. 2010, Hoppe, et al. 2018, Jennings, et al. 2010a, Jennings, et al. 2010b, Johnston, et al. 2014, Johnston, et al. 2012, Malone, et al. 2017, Nagahara, et al. 2016, Petersen, et al. 2009, Rampinini, et al. 2014, Rawstorn, et al. 2014, Scott, et al. 2015, Varley, et al. 2012b, Vickery, et al. 2014). D'une manière générale, il ressort de ces études que la validité des mesures GPS est dépendante de la vitesse de déplacement et de la linéarité des déplacements. En effet, plus la vitesse est élevée et plus les déplacements présentent des changements de directions, plus la fiabilité de la mesure est limitée. Il ressort de l'ensemble de ces études que plus la vitesse de déplacement est élevée, plus la qualité de la mesure se détériore. En effet, la TEE de la vitesse de déplacement est inférieure à 5 % lors de la course lente (vitesse inférieure à $14 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) et devient supérieure à 15 % pour les sprints au-delà de $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (Beato, et al. 2018, Scott, et al. 2015). De même, des études ont mis en évidence une TEE de la mesure de la distance parcourue passant de 2 % en ligne droite à 7-9 % en cas de changements de directions (Johnston, et al. 2014, Vickery, et al. 2014). Nous pouvons donc considérer qu'il en va de même dans le cas des LPS puisque, comme nous l'avons vu, leurs fonctionnements sont similaires. La validité des différents outils LPS est encore sujette à caution puisque peu d'études ont été menées sur ce sujet. Deux groupes de chercheurs ont examiné, en gymnase, la validité d'un système LPS ClearSky basé sur la technologie UWB (utilisant une fréquence d'échantillonnage de 10 ou 20 Hz) en utilisant un dispositif de capture de mouvement (systèmes Vicon® et Qualisys®, chacun à 100 Hz) comme critère de référence. L'évaluation de cet outil LPS a porté sur des mouvements linéaires à différentes vitesses et des changements de direction successifs de 45° . D'une part, l'étude de Serpiello et al. (2018) a montré que le LPS avait une validité acceptable pour évaluer les schémas locomoteurs des sports en salle en comparaison du système de capture de mouvement (cf. Figure 3). En effet, les différences moyennes de mesure de la Distance Totale (DT), de la vitesse moyenne et maximale, et des accélérations moyenne et maximale entre le Vicon® et le système ClearSky étaient de l'ordre de 0,2 à 12,0 %, avec une TEE comprise entre 1,2 et 9,3 %.

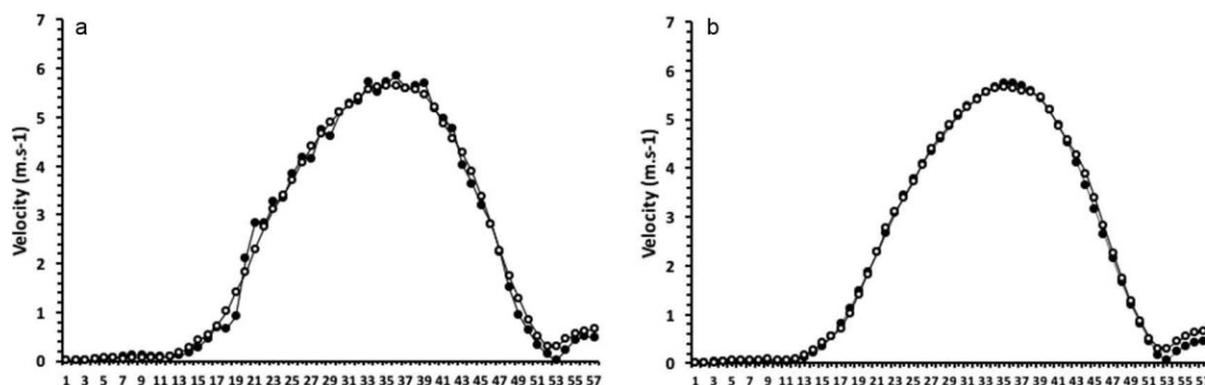


Figure 3 : Vitesse instantanée mesurée en sprint avec les systèmes Vicon (cercles noirs) et ClearSky (cercles blancs) avant filtrage (gauche) et après filtrage équivalent (droite), d'après Serpiello et al. (2018).

D'autre part, Luteberget et al. (2018b) ont montré que les mesures du LPS étaient plus représentatives de la position et des déplacements du joueur au centre du terrain que sur les côtés. Il y avait des différences substantielles par rapport au système de capture du mouvement utilisé comme critère de référence, tant pour les distances parcourues que pour la vitesse moyenne, qui étaient dix fois plus importantes au bord du terrain (15 - 30 %) qu'au centre (1 - 3 %). Pour autant, ces études ont toutes deux conclu que le système ClearSky pouvait être considéré comme valable pour la mesure des déplacements en sport collectif en gymnase.

Un autre système LPS, WIMUPRO™, a fait l'objet d'études sur la validité de ses mesures. La première étude a établi la précision des mesures de distance parcourue en comparaison de la distance réelle et de la vitesse moyenne en comparaison avec des portes de chronométrage. Celle-ci a conclu à une validité suffisante des mesures avec des biais de Bland-Altman suffisamment petits pour la distance parcourue (-1.38 - 1.51) et la vitesse moyenne (-0.56 - 0.57). Cette étude a également montré une bonne fiabilité test - re test (% TEM : 1.19 ± 0.25) ainsi qu'une bonne fiabilité inter-unités (biais : -2.65 - 2.06) pour le LPS (Bastida Castillo, et al. 2018). Ce même système LPS a par la suite été testé à nouveau lors de deux autres études pour lesquelles le système de référence utilisé était un Système d'information géographique. Ce type d'outil permet de créer, gérer, analyser et cartographier tous les types de données de créer, gérer, analyser et cartographier tous les types de données avec une précision allant jusqu'au millimètre. Lors de ces deux études les variables analysées étaient la surface (Gis Area) et le périmètre de la zone (Gis Length). Celles-ci ont été rapportés pour le suivi des deux types de technologie de suivi, GPS et LPS (cf. Figure 4). Les résultats de la comparaison de la précision "x" et "y" étaient significativement plus faibles pour le LPS dans tous les cas ($p < 0,05$, et un

coefficient de variation <1%) avec un ES de 0,78 et 0,95, respectivement. Les résultats ont permis de montrer qu'il s'agit d'un système valide pour mesurer la locomotion et le positionnement (Bastida-Castillo, et al. 2019, Pino-Ortega, et al. 2020).

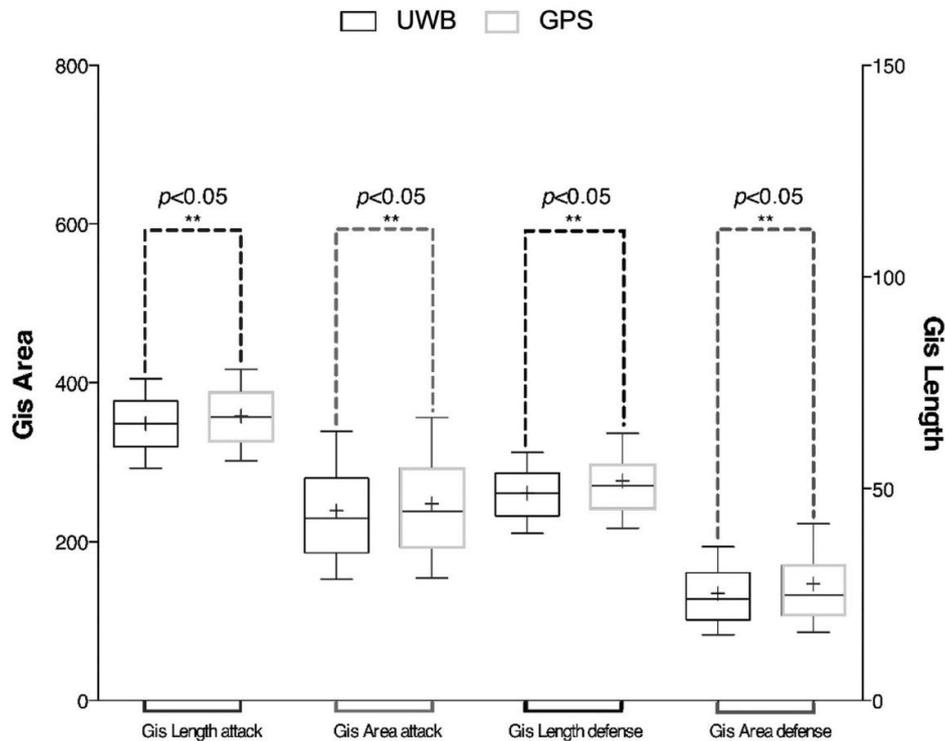


Figure 4 : Graphique en boîte et moustaches avec les différences (m) des deux systèmes (UWB et GPS) dans les variables Gis Longueur et Gis Surface analysées lors de jeux réduits d'après Bastida-Castillo et al. (2019).

Un autre système LPS, Kinexon (Kinexon GMBH, Munich, Allemagne) est aujourd'hui utilisé dans le Handball et le Basketball. La validité de celui-ci, étudié par Hoppe et al. (2018), s'est révélée meilleure que celle de deux autres systèmes GPS, précédemment considérés comme "valides". Cette étude menée en extérieur, sur un terrain de Football sec en gazon artificiel, dans des conditions météorologiques appropriées, s'appuie sur un circuit conçu pour imiter les mouvements fondamentaux de la plupart des sports d'équipe de manière standardisée. Le principal résultat de cette étude a été une TEE pour la distance parcourue de 1,0 - 6,0 % pour le système LPS contre 1,6 - 8,0 % et 3,0 - 12,9 % pour les deux systèmes GPS. Dans cette dernière étude, aucun système de référence tel qu'un outil de capture de mouvement, n'était utilisé afin de tester la validité des mesures effectuées avec les différents systèmes GPS et LPS. De plus, les schémas locomoteurs (y compris les vitesses, accélérations et décélérations) n'ont été examinés qu'à l'aide de la DTp et des temps de passages entre des cellules photoélectriques. Nous n'avons donc pas d'information sur la qualité de la mesure de la vitesse et de l'accélération/décélération. En outre, l'effet de la position sur le terrain (centre ou bord) n'a pas

été testé concernant ce système LPS. Une nouvelle étude, menée par Blauberger et al., en 2021, a porté sur la capacité du système Kinexon™ à mesurer la position, la distance parcourue, les vitesses de déplacements, les accélérations et les décélérations notamment lors de courses spécifiques et de jeux réduits de Football (cf. Tableau 2). Les résultats de cette étude ont montré une erreur de mesure de la position de l'ordre de 9 ± 2 cm durant les courses spécifiques, et de 8 ± 1 cm durant les jeux réduits. Ces résultats sont tout à fait corrects au regard l'activité devant être mesurée par cet outil (i.e., 80 cm la longueur moyenne d'un pas humain). La légère détérioration de la mesure durant les courses spécifiques peut tout à fait s'expliquer par le fait que celles-ci contiennent plus d'événements critiques (i.e., fortes accélérations et décélérations, changements de directions, vitesses de déplacements plus élevées). Les distances parcourues présentent une légère surestimation de la part du système Kinexon par rapport à un système de capture du mouvement (Qualisys®). Durant les six exercices de courses spécifiques aux sports testés, l'erreur de mesure de la distance restait entre 0,7 et 1,7 %. Cette fourchette d'erreur était plus grande dans le cadre de la mesure de la décélération (0,3 - 4,3 %) et encore plus importante pour les accélérations (1,3 - 10,2 %). Cependant, ces résultats sont considérés comme suffisant pour estimer que le système Kinexon™ est fiable dans ces mesures de position instantanée, de vitesse, d'accélération et de décélération dans le cadre d'activité sportive. Nous noterons tout de même que la qualité de la mesure effectuée par ce système Kinexon™ n'a pas non plus été testée en bord de terrain lors de cette étude, or, comme l'ont montré Malone et al. (2017) et Luteberget et al. (2018), c'est dans cette configuration que les systèmes GPS et LPS sont les moins performants.

	Position (m)				Speed (m·s ⁻¹)		Accélération (m·s ⁻²)	
	RMSE ± SD	MAE ± SD	CEP	CE 95	RMSE ± SD	MAE ± SD	RMSE ± SD	MAE ± SD
Total	0.09 ± 0.02	0.08 ± 0.01	0.07	0.15	0.07 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.20 ± 0.05	0.12 ± 0.01
Sprint	0.13 ± 0.03	0.12 ± 0.02	0.12	0.19	0.11 ± 0.04	0.09 ± 0.03	0.18 ± 0.07	0.14 ± 0.05
405-Agility	0.08 ± 0.03	0.07 ± 0.02	0.07	0.13	0.07 ± 0.03	0.06 ± 0.02	0.25 ± 0.17	0.15 ± 0.05
SSC Zig-Zag	0.07 ± 0.02	0.06 ± 0.02	0.06	0.10	0.04 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.10 ± 0.02	0.08 ± 0.02
SJ + sharp turns	0.08 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.07	0.13	0.07 ± 0.02	0.05 ± 0.01	0.18 ± 0.05	0.12 ± 0.03
Lunges	0.08 ± 0.02	0.07 ± 0.02	0.07	0.12	0.06 ± 0.02	0.05 ± 0.02	0.28 ± 0.14	0.19 ± 0.09
Curved sprints	0.11 ± 0.03	0.10 ± 0.03	0.07	0.17	0.10 ± 0.03	0.07 ± 0.02	0.31 ± 0.14	0.16 ± 0.05
SSG Player	0.08 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.6	0.13	0.06 ± 0.02	0.04 ± 0.01	0.18 ± 0.04	0.10 ± 0.02
SSG Ball	0.15 ± 0.03	0.12 ± 0.02	0.11	0.22	1.61 ± 0.75	0.86 ± 0.09	36.06 ± 14.57	19.22 ± 2.21

Tableau 2 : Erreurs de position, de vitesse et d'accélération mesurées pour le parcours sportif (SSC) et les matchs de Football à effectif réduit (SSG). Pour chaque catégorie, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur absolue moyenne (MAE) ainsi que leur écart-type (SD) sont indiquées. CEP indique l'erreur de position médiane, CE95 le 95ème percentile des valeurs d'erreur ; d'après Blauberger et al. (2021).

Concernant les accéléromètres embarqués dans les systèmes LPS et GPS, les différentes études ayant testé leur validité s'accordent à dire qu'ils peuvent être considérés comme valides pour mesurer l'activité des joueurs durant les matchs et les entraînements (Barrett, et al. 2014, Crang, et al. 2021, Hollville, et al. 2015, Hoppe, et al. 2018, Kelly, et al. 2015, Nicolella, et al. 2018). La comparaison des données des accéléromètres avec celles issues de plateformes de forces ou autre système de références, démontre un coefficient de corrélation de Pearson entre 0.74 et 0.93, et un coefficient de variation allant de 2.5 à 20 % selon les accéléromètres. L'utilisation des plateformes de force comme outil de référence est possible du fait que celles-ci permettent de déterminer, comme leur nom l'indique, la force appliquée au sol par un sujet lors de son déplacement. Or, une force est le produit d'une accélération par une masse (ici la masse du sujet), d'après la formule $F = ma$ (Cavagna 1975). Il ressort de ces études que plus les déplacements se font à vitesse élevée, plus les erreurs de mesures sont importantes (cf. Figure 5). Ce qui est similaire à ce que l'on peut observer pour les systèmes de suivi de la position.

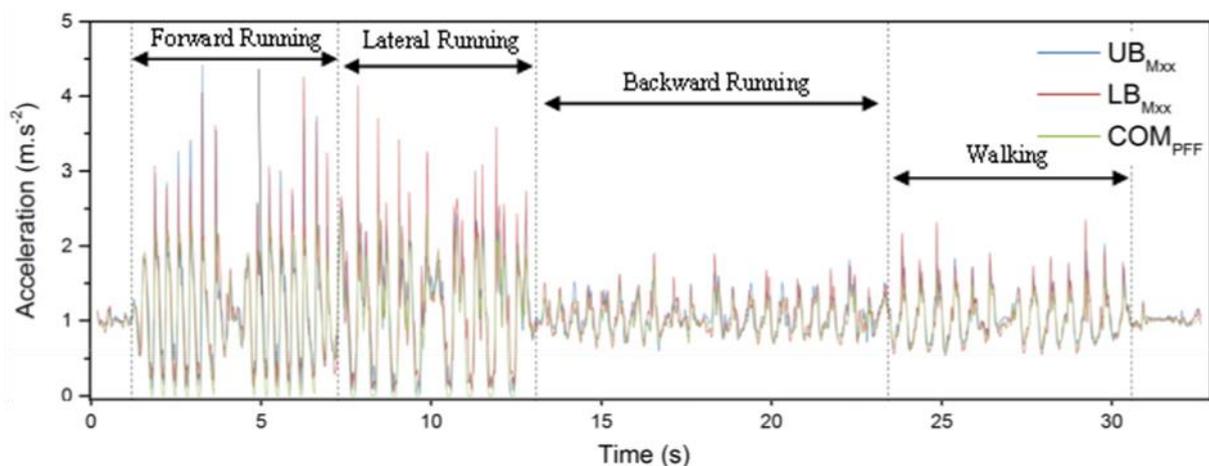


Figure 5 : Exemple typique des signaux d'accélération (en m.s⁻²) en fonction du temps (en s) mesurés avec les accéléromètres MinimaxX situés dans le haut du dos (UB_{MXX}) et le bas du dos (LB_{MXX}) et avec le système de plateformes de force (COM_{PFF}) pendant les déplacements, d'après (Hollville, et al. 2021).

2.3 Bilan

Pour conclure ce chapitre nous proposons un bilan rapide sur les différents systèmes décrits ci-avant et sur les problématiques nécessitant encore d'être approfondies. En premier lieu nous pouvons rappeler que les systèmes de notation vidéographique ne sont pas suffisants pour effectuer l'analyse de l'activité des joueurs en entraînement et en match, particulièrement du fait de leur aspect chronophage et parce qu'ils sont très sensibles à l'opérateur effectuant les mesures. C'est pourquoi il leur sera préféré les systèmes semi-automatiques. Toutefois, ces

derniers présentent encore plusieurs problématiques, la première étant la nécessité d'intervention humaine pour vérifier leur bon fonctionnement, ce qui reste encore très chronophage. C'est pourquoi ces outils ne sont plus tant utilisés pour l'analyse de l'activité déployée par les joueurs en match et en entraînement. Néanmoins, ces systèmes présentent de réels intérêts pour les encadrements des équipes en ce qu'ils permettent de procéder rapidement et efficacement à des analyses technico-tactiques. Enfin, il est important de différencier les systèmes vidéographiques semi-automatiques classiques, s'appuyant sur des caméras classiques ne nécessitant aucun matériel spécifique porté par les joueurs, et les systèmes de capture du mouvement qui eux s'appuient sur des caméras infrarouges et des marqueurs particuliers portés par les joueurs. Dans le cadre de ces derniers, ils ne sont pas exploitables pour l'analyse de l'activité des joueurs en match et en entraînements car leur utilisation est conditionnée à la détection de marqueurs passifs porté par les joueurs, généralement plusieurs placés sur les membres, ce qui est contraignant pour la pratique sportive. Ces outils étant néanmoins extrêmement précis, ils restent des systèmes de références particulièrement adapté pour tester la validité des autres systèmes lors de situations standardisées. Enfin, la dernière technologie que nous avons pu abordée précédemment sont les GPS et LPS. Ces deux types d'outils sont similaires dans leur fonctionnement, à la différence près que les GPS sont utilisables dans n'importe quel espace ouvert, et que les LPS définissent un espace précis dans lequel les mesures peuvent être effectuées. Ces derniers présentent également l'intérêt de pouvoir être utilisés en salle, là où les GPS ne sont pas exploitables. L'ensemble de ces solutions qui ont pu être testées jusqu'à présent ont montré des précisions de mesure pouvant être considérées comme valides pour l'analyse de l'activité sportive. Toutefois, en particulier pour les LPS, des différences ont pu être mis en évidence quant à leurs validités en fonction de la configuration de ceux-ci. C'est pourquoi, pour l'outil Kinexon™, il nous semble important de procéder à une validation plus avancée des mesures effectuées, en termes de distance parcourue, vitesse maximale et accélérations et décélérations maximales.

3. ANALYSE DE L'ACTIVITÉ DES JOUEURS LORS DES COMPÉTITIONS ÉLITES

L'utilisation d'outils de quantification de l'activité, tels que ceux présentés précédemment, permet d'obtenir des données pour analyser l'activité des joueurs durant les compétitions à la fois en termes de volume et d'intensité. Cette analyse des matchs est d'ailleurs effectuée depuis de nombreuses années en Football ou en Rugby mais reste encore peu approfondie en Handball.

L'analyse de l'activité en compétitions consiste, dans un premier temps, à calculer le temps de jeu effectif puis la DTp durant les matchs pour chacun des joueurs et/ou chacun des postes afin de comprendre le volume d'activité globale des joueurs. Dans un second temps il s'agit de définir des zones d'intensités selon des critères subjectifs (analyse notationnelle) ou objectifs (analyse avec les systèmes semi-automatiques et GPS). Pour chacune de ces zones d'intensité il est mesuré à la fois le temps passé et la distance parcourue par chaque joueur. Cela permet d'obtenir une première idée de l'intensité de l'activité des joueurs durant les matchs, mais uniquement de manière globale. Pour aller plus loin dans l'analyse il est possible de s'intéresser à la quantification des événements de haute intensité tels que les accélérations, décélérations et sauts. Ce niveau d'analyse nous renseigne un peu plus précisément sur la nature de l'activité et son impact physiologique mais n'est pas encore suffisant pour appréhender complètement l'intensité de l'activité déployée par les joueurs. C'est pourquoi la dernière étape de l'analyse de l'activité en compétition consiste à étudier l'intensité maximale produite par les joueurs durant les matchs à travers l'étude des pics d'intensités. L'objectif est alors de comprendre quelle est l'intensité maximale produite par les joueurs durant des périodes plus ou moins longues de jeu afin de mieux comprendre les efforts qu'ils sont amenés à devoir fournir par exemple en match officiel.

Les différences de résultats entre les premières études menées et celles plus récentes, peuvent en partie s'expliquer par l'évolution de l'activité Handball et de ses règles du jeu ces dernières années. L'introduction de nouvelles règles mises en place en 2016 aux Jeux Olympiques de Rio ont engendré des modifications de l'activité des joueurs de champs et bien évidemment du gardien, qui se retrouve à effectuer plus de courses qu'auparavant, pour rejoindre rapidement son but dès la fin de la possession de balle. De plus, la professionnalisation du Handball à la fin des années 2000 a, de fait, engendré une évolution dans le jeu dans les années qui ont suivi.

Cela se retrouve particulièrement dans la capacité des joueurs à performer à différents postes, que cela soit en attaque ou en défense. Il est donc important d'offrir aux équipes d'encadrements des structures professionnelles des informations d'actualités sur l'activité des joueurs en compétition.

3.1 Temps de jeu effectif des joueurs

Le Handball est un sport collectif dont le nombre de rotation est illimité durant les compétitions, ce qui permet, à priori, aux joueurs de conserver le plus haut niveau de performance possible lorsqu'ils sont sur le terrain. Néanmoins, malgré ces possibilités de rotations, les auteurs rappellent qu'il est indispensable de mieux cerner les caractéristiques propres à chacun des postes afin de mieux préparer les joueurs aux efforts qu'ils seront amenés à produire durant les matchs. Pour cela la première chose est de bien connaître le temps d'effort moyen de chacun des postes. Les études portant sur l'activité Handball en match ont rarement analysé le temps de jeu effectif des joueurs, que cela soit de manière générale ou par poste. Ceci est notamment dû à la difficulté d'effectuer ces mesures liées aux nombreux changements opérant durant les matchs. Toutefois, nous avons recensé quatre études ayant produit cette analyse. Dans leur étude Cardinale et al. (2017) ont montré que le temps de jeu moyen était de $36,48 \pm 20,07$ minutes, ce qui est assez similaire à ce qu'avait pu montrer Luig et al. (2008) et Michalsik et al. (2016) avec un temps de jeu moyen respectivement de $32,11 \pm 15,34$ minutes et de $38,40 \pm 22,23$ minutes. Dans leur étude, Luig et al. (2008) sont allés plus loin en présentant les temps de jeu par poste en tenant compte des temps morts techniques et des arrêts de jeux mais sans distinction entre les deux périodes d'un même match. Ils ont montré que les gardiens ($37,11 \pm 3,28$ min) et les ailiers ($37,37 \pm 2,37$ min) sont les joueurs passant le plus de temps sur le terrain devant les arrières ($29,16 \pm 1,70$ min) et les pivots ($29,37 \pm 2,70$ min). Ces résultats sont légèrement inférieurs, mais en accord, avec ceux de Michalsik et al. (2016). Enfin, l'étude de Manchado et al. (2021), portant sur les Championnat d'Europe 2020, ont montré un temps de jeu moyen inférieur, de $26,48 \pm 14,94$ minutes, mais sans inclure les gardiens dans l'analyse. Or les joueurs à ce poste sont parmi ceux ayant généralement le plus long temps de jeu effectif durant les matchs car peu de rotations sont effectuées à ce poste, ce qui peut expliquer les différences avec les autres études. Des mesures effectuées par la fédération européenne de Handball à l'aide de chronomètres, pendant le Championnat d'Europe masculin 2012, ont montré que, sur l'ensemble des joueurs participant, seuls 13 % passent en moyenne

plus de 45 minutes sur le terrain, tandis que 26 % d'entre eux y passent entre 30 et 45 minutes. 36 % des joueurs sont présents entre 15 et 30 minutes sur le terrain et enfin, 26 % d'entre eux passent moins de 15 minutes sur le terrain, tous postes confondus. La même analyse, répétée lors du Championnat d'Europe masculin de Handball de 2020, cette fois ci à partir des données du système Kinexon™, a mis en évidence que seuls 12 % des joueurs ont un temps de jeu supérieur à 45 minutes en moyenne par match. 27 % des joueurs ont un temps de jeu compris entre 30 et 45 minutes, 32 % d'entre eux sont présents sur le terrain entre 15 et 30 minutes et enfin 29 % d'entre eux passent moins de 15 minutes sur le terrain (cf. Figure 6).

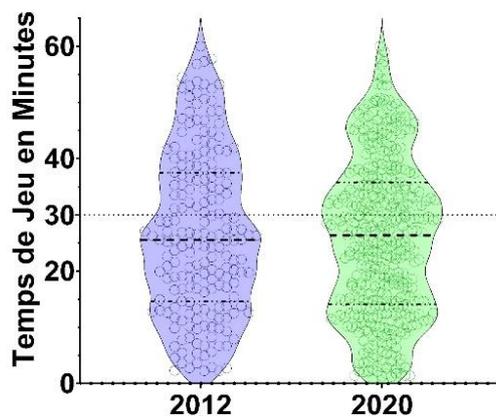


Figure 6 : Évolution de la répartition du temps de jeu en Handball.

Dans leur étude, Karcher et Buchheit (2014) ont analysé le nombre de remplacements effectués en fonction du poste. Cette étude reste la seule, à ce jour, à avoir quantifié le nombre de rotations durant des matchs officiels de Handball en distinguant les postes. Les auteurs ont montré en s'appuyant sur 7 matchs de 1^{ère} division de championnat de France que les ailiers effectuent en moyenne 3 ± 2 rotations par match, les arrières latéraux 13 ± 9 et les pivots 27 ± 6 .

3.2 Volume de l'activité

Il semblerait que la première étude portant sur la quantification de l'activité des joueurs de Handball en match soit celle de Konzag et Schacke (1968). Bien que les auteurs ne reportent pas les vitesses correspondant aux rythmes "moyen" et "rapide", ils montrent que les joueurs parcourent en moyenne 4152 m dont 3153 m à un rythme moyen et 394 m à un rythme rapide. À notre connaissance, à la suite de cette étude, aucune autre n'a été menée sur le sujet avant celle de Garcia Cuesta (1983). Cette dernière, menée à la demande de la fédération espagnole de Handball, portait sur les joueurs de l'équipe nationale d'Espagne lors du championnat du

monde de 1982. Celle-ci a, pour la première fois, détaillé l'analyse par poste et présente une DTp respectivement de 3464 ± 256 m et 2857 ± 189 m pour les arrières gauches et droits. Pour les ailiers gauches et droits, les distances parcourues étaient de 3557 ± 311 m et 4083 ± 286 m, tandis que pour les pivots la distance parcourue était de 2857 ± 145 m. Ces études princeps, ont le mérite de fournir les premières informations sur l'activité des joueurs de Handball durant les matchs précédant l'application de nouvelles règles en 2000 et 2016. Or, ces évolutions de jeu avaient pour but d'accélérer et de dynamiser les matchs.

Le Tableau 3 ci-dessous regroupe l'ensemble des données des études portant sur le volume d'activité des joueurs de Handball en compétition depuis le début des années 2000 et l'étude de Šibila et al. (2004).

Distance Totale Parcourue (DTp)							
	Demi-Centre	Arrière Droit	Arrière Gauche	Ailier Droit	Ailier Gauche	Pivot	Gardien
Šibila et al. (2004)		3432 ± 243		3855 ± 310		3234 ± 150	1753 ± 165
Luig et al. (2008)		2840 ± 151		3711 ± 210		2787 ± 239	2058 ± 290
Póvoas et al. (2014)		$4960+640$		4230 ± 520		3910 ± 510	
Michalsik et al. (2016)		2574 ± 1491		3987 ± 1778		2562 ± 1363	1550 ± 1077
Cardinale et al. (2017)	2699 ± 1189	2587 ± 1414	2411 ± 1338	3404 ± 1603	3339 ± 1640	2419 ± 1225	
Manchado et al. (2021)	2194 ± 1049	1943 ± 1003	1888 ± 962	2372 ± 1457	2547 ± 1310	1835 ± 979	

Tableau 3 : Récapitulatif des DTp par postes selon les différentes études.

L'étude de Póvoas et al. (2014), se doit d'être analysée à part puisqu'il s'agit de la seule étude du Tableau 3 à être basée sur une analyse vidéographique notationnelle similaire à celle employées dans les études antérieures à celles du tableau. Elle est également importante car il s'agit de la seule étude ayant conclu, sans distinction de latéralité, à une DTp supérieure des arrières par rapport à celle des ailiers et pivots. Ce résultat atypique peut s'expliquer entre autres par l'analyse de 10 matchs officiels de la ligue professionnelle portugaise de Handball, incluant 10 joueurs de chacun des postes. En effet, le championnat national Portugais ne présentait pas, jusqu'à un passé tout récent (moins de 5 ans), un niveau de jeu aussi élevé que les autres championnats européens. De plus, l'utilisation d'une analyse notationnelle peut amener à des différences plus importantes de mesures que les autres types d'analyses, d'ailleurs cette étude de Póvoas et al. (2014) est la seule à présenter des distances totales supérieur à 4000 m, quel

que soit le poste. Par ailleurs, il est intéressant de mettre en relation les données des études de Šibila et al. (2004) et de Luig et al. (2008). En effet, ces deux études ont travaillé à l'aide du même outil d'analyse vidéographique semi-automatique, le système SAGIT. Ces travaux sont concordants (cf. Figure 7), et permettent de mettre en évidence des différences significatives dans les distances parcourues en match en fonction des postes. Ainsi, les ailiers parcourent la plus grande DT devant les arrières, et les pivots, tandis que les gardiens parcourent la plus faible distance (cf. Tableau 3).

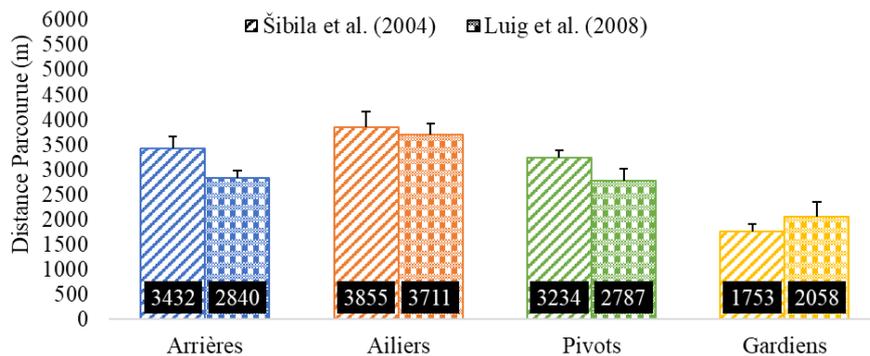


Figure 7 : DTp \pm SD (en m) par poste d'après Šibila et al. (2004) et Luig et al. (2008).

Il est également intéressant de rapprocher les études de Michalsik et al. (2016), Cardinale et al. (2017) utilisant une analyse semi-automatique et l'étude de Machado et al. (2021) utilisant un système LPS. En effet, ces trois études présentent des résultats assez similaires (cf. Figure 8) mais aussi des écarts types bien plus grands que les autres études. Cette différence dans les écarts types peut avoir différentes raisons. Tout d'abord, le changement de système de mesure peut impacter les mesures. Il est également possible que l'évolution de l'activité, qui a vu augmenter la vitesse et l'intensité du jeu, permettent d'expliquer les plus grands écarts-types, notamment du fait du plus grand nombre de remplacements effectués. De même, l'augmentation de ces remplacements peut s'expliquer par un plus grand professionnalisme de l'activité.

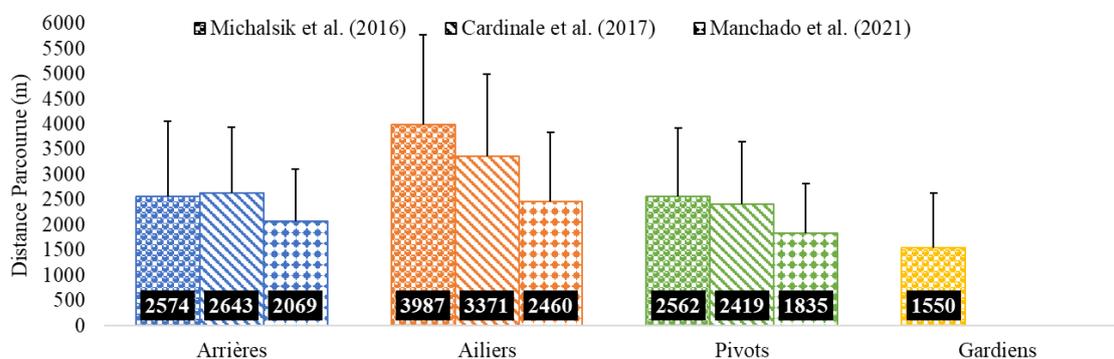


Figure 8 : DTp \pm SD (en m) par poste d'après Michalsik et al. (2016), Cardinale et al. (2017) et Machado et al. (2021).

Enfin, il est possible d'approfondir l'analyse en s'intéressant particulièrement aux études de Cardinale et al. (2017) et de Machado et al. (2021). En effet, ces deux études ont détaillé leurs analyses en séparant les postes selon leur latéralité (cf. Figure 9) mais obtiennent des résultats cohérents avec ceux de Šibila et al. (2004), Luig et al. (2008) et Michalsik et al. (2016). Il est intéressant de noter une diminution générale de la distance parcourue, quel que soit le poste observé, dans l'étude de Machado et al. (2021). La distinction des trois postes formant la base arrière a permis de mettre en évidence la spécificité du poste de demi-centre. Ce poste présente un plus grand volume de jeu (cf. Tableau 3), ce qui est représentatif du rôle spécifique de ce joueur qui est d'organiser le jeu ce qui nécessite de produire davantage de déplacements pour être efficace.

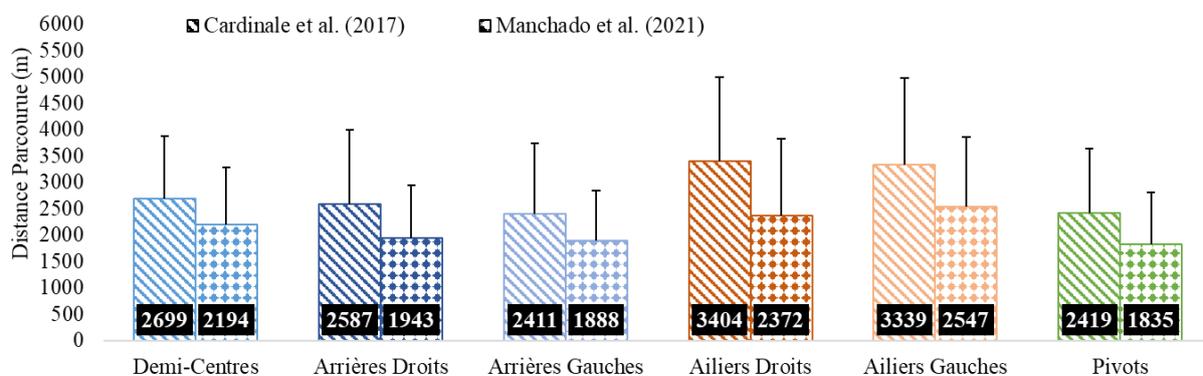


Figure 9 : DTp \pm SD (en m) par postes, différenciés par latéralité, d'après Cardinale et al. (2017) et Machado et al. (2021).

L'ensemble de ces études sont particulièrement intéressantes pour mieux comprendre le volume d'activité des joueurs durant les matchs mais s'avèrent insuffisantes pour permettre une programmation minutieusement des entrainements adaptés aux exigences de la compétition. En effet, il est nécessaire, pour pouvoir calibrer les entrainements, d'avoir, à minima, une connaissance de la répartition de ce volume d'activité selon les intensités de courses.

3.3 Distribution du volume de l'activité

Dans le but d'analyser plus finement la DTp par les joueurs durant les matchs, un certain nombre d'études ont détaillé la répartition du volume de jeu selon différentes intensités. D'une manière générale les déplacements en Handball se catégorisent en cinq types de déplacements, à savoir la marche, la course, les sprints et les déplacements arrière et latéraux (Al-Lail 2001). D'ailleurs Cambel (1985) proposa une étude approfondie de l'activité Handball en analysant les vitesses de déplacement à l'aide d'une analyse vidéographique notationnelle. Il montra ainsi

que 80 % de la DTp par les joueurs, sans distinction de postes, s'effectuent en marchant, à une vitesse inférieure à $7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Les courses, différenciées en deux gammes de vitesse, représentent 15 % de la DT entre 7 et $14,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, et 5 % entre $14,5$ et $29,0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ tandis que les sprints ne représentent qu'environ 1 % du volume d'activité avec des vitesses comprises entre $29,0$ et $32,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. À la suite de cette étude, il aura fallu attendre le début des années 2000 pour que de nouvelles recherches soient menées sur l'intensité des déplacements en match en Handball. L'étude d'Al-Lail et al. (2001), aussi menée à l'aide d'analyse notationnelle, montre que la marche et la course sont les principaux modes de déplacements employés, devant les déplacements latéraux, les sprints et la course arrière qui est le type de déplacement le moins utilisé (cf. Figure 10). Enfin, la dernière étude utilisant l'analyse notationnelle et présentant des données relatives aux intensités de déplacements que nous avons répertoriée est celle de Póvoas et al. (2012). Cette dernière présente globalement des valeurs supérieures pour toutes les catégories de déplacements hormis les sprints (cf. Figure 10).

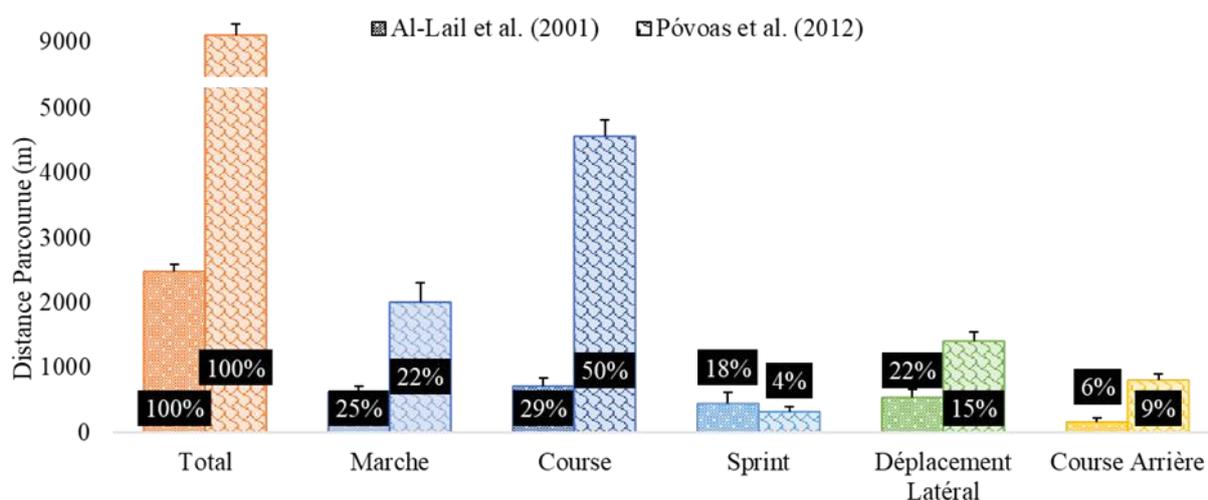


Figure 10 : DTp \pm SD (en m) par type de déplacement selon Al-Lail et al. (2001) et Póvoas et al. (2012).

Dans leur étude, Póvoas et al. (2012) ont aussi détaillé l'activité, à la fois en termes de distances parcourues et de temps passé dans les différentes catégories, selon les postes et en différenciant les déplacements latéraux selon leur intensité. Cette étude montre que, hormis pour les arrières, la majorité du temps de jeu le joueur est en position d'attente et que les arrières présentent le plus gros volume de jeu mais que ce sont les ailiers qui ont le plus de courses rapides et de sprints (cf. Figure 11 & Figure 12).

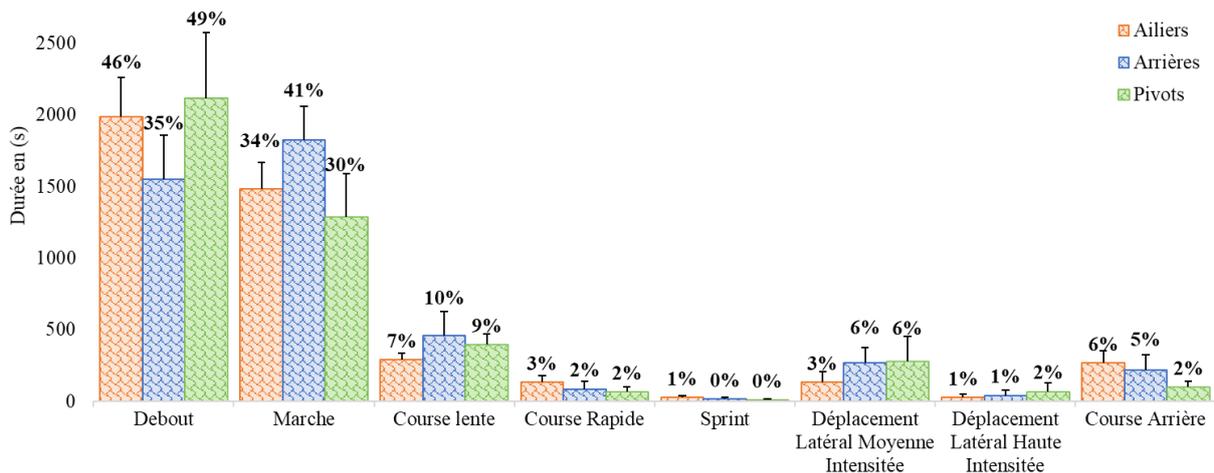


Figure 11 : Temps passé \pm SD (en s) dans les différentes catégories de déplacements selon les postes d'après Póvoas et al. (2012).

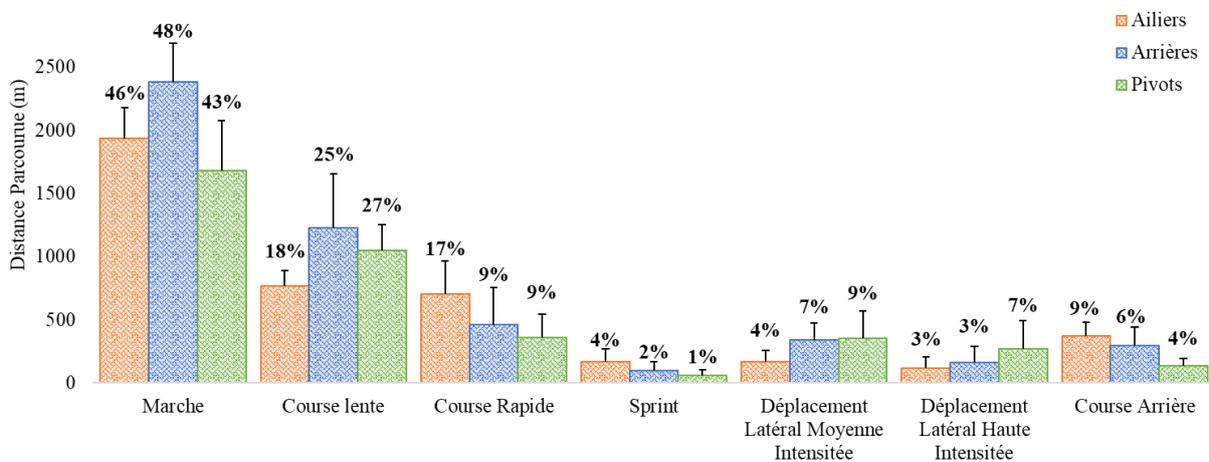


Figure 12 : DTp \pm SD (en m) dans les différentes catégories de déplacements selon les postes d'après Póvoas et al. (2012).

À la suite de ces études, les recherches menées sur l'activité en Handball se sont appuyées sur des analyses vidéographique semi-automatiques. Les études de Šibila et al. (2004) et de Luig et al. (2008) ont étudié la répartition du temps passé dans différentes zones d'intensité. Bien que les deux études soient similaires dans leurs méthodologies, l'utilisation de gammes de vitesses différentes amène les auteurs à des résultats divergents. Dans le cadre de l'étude de Luig et al. (2008), les auteurs ont différencié quatre gammes de vitesses à savoir la marche ($< 5,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), la course lente (entre $5,5$ et $14,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), la course rapide (entre $14,5$ et $25 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) et enfin le sprint ($> 25 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$). Toutefois, aucune différence significative entre les différents postes n'a été observée. Il a ainsi été analysé, pour l'ensemble des joueurs, que la marche représente $34,3 \pm 4,9 \%$ du temps de match, la course lente $44,7 \pm 5,1 \%$, la course rapide $17,9 \pm 3,5 \%$ et le sprint $3,0 \pm 2,2 \%$. De leur côté, Šibila et al. (2004) ont défini la vitesse de marche comme étant inférieure à $5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, la course lente entre 5 et $12,2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, la course

rapide entre 12,2 et 18,7 km·h⁻¹ et le sprint au-dessus de 18,7 km·h⁻¹. À partir de ces définitions, les auteurs ont montré que la marche représente la plus grande partie des déplacements des joueurs quel que soit leur poste. À l’opposé, les sprints ne concernent qu’une très faible partie de l’activité des joueurs (moins de 5 %). Les courses lentes et rapides représentent environ 15 % des déplacements des ailiers et des arrières. Pour les pivots, celles-ci ne représentent respectivement que 15 % et 10 % de leur activité. Les différences de résultats obtenus par ces deux études mettent bien en évidence l’importance de la définition des gammes de vitesse pour catégoriser les intensités des déplacements. Dans leur étude, utilisant l’outil LPS pour mesurer l’activité des joueurs, Machado et al. (2021) ont confirmé que les ailiers sont les joueurs présentant le plus de courses à haute vitesse par rapport aux pivots et arrières, et ce d’autant plus nettement que les vitesses sont grandes (cf. Figure 13).

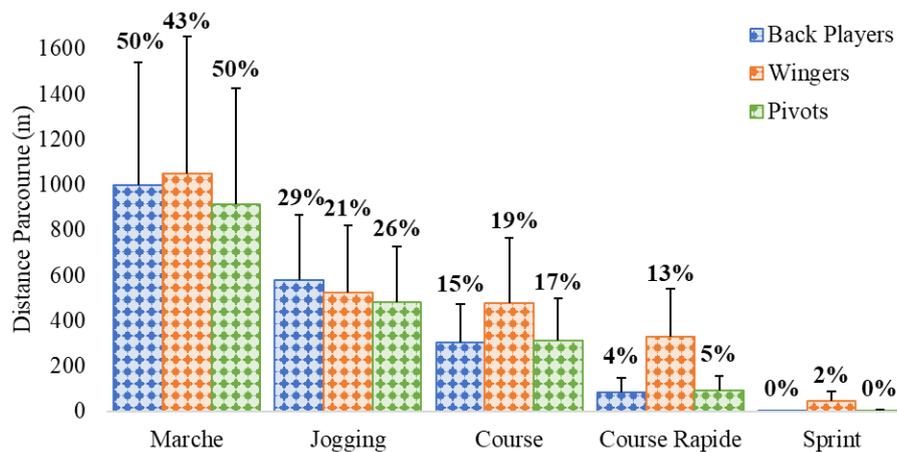


Figure 13 : Intensités de déplacements, DTp ± SD (en m) par postes d’après Machado et al. (2021).

Dans le cadre de leur étude, Machado et al. (2021) ont aussi détaillé l’activité des joueurs selon leurs postes et leurs latéralités, ce qui permet de confirmer que les arrières gauches (droitiers) ont une activité inférieure aux arrières droits (gauchers), mais que cela n’est pas le cas des ailiers. De plus, les auteurs font également ressortir la spécificité du poste de demi-centre puisqu’il présente une plus grande distance parcourue en jogging (entre 2.0 – 3.9 m·s⁻¹), course (4.0 – 5.4 m·s⁻¹), course à haute vitesse (5.5 – 6.9 m·s⁻¹) et sprint (>7 m·s⁻¹) que les autres joueurs de la base arrière (Machado, et al. 2021). Cela représente la spécificité de ce poste qui consiste à impulser les tactiques offensives, donc d’être à l’origine du rythme de l’attaque. De plus, ce joueur étant en position centrale sur la base arrière, il est naturellement le plus sollicité des trois (cf. Figure 14).

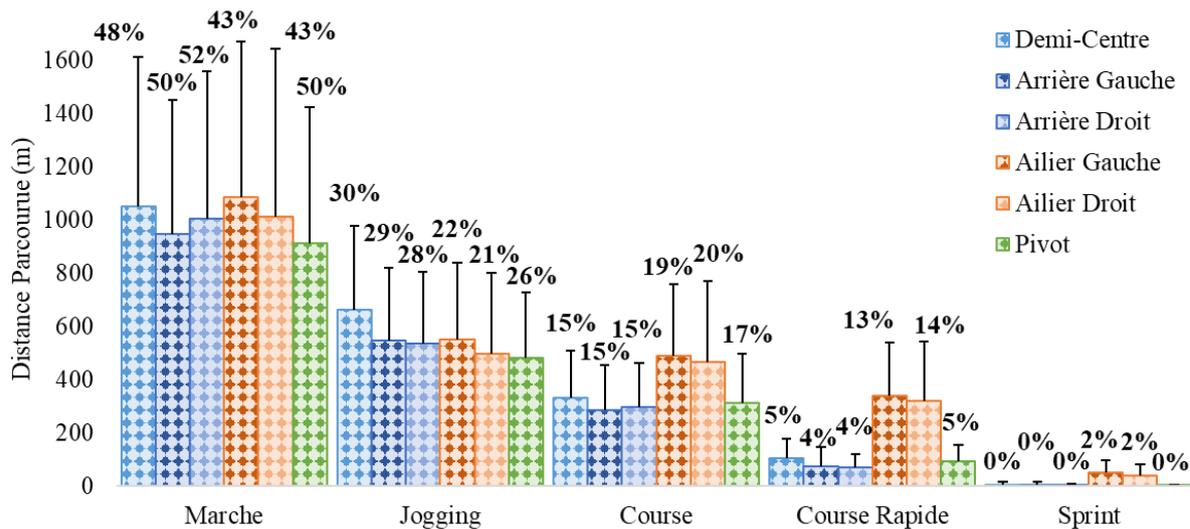


Figure 14 : DTp \pm SD (en m) durant les matchs selon les postes et leurs latéralités d'après Manchado et al. (2021).

Le temps passé, ainsi que la DTp dans différentes zones d'intensité sont des éléments indispensables pour affiner les exigences physiques de l'activité Handball selon les postes et ainsi adapter plus précisément les contenus d'entraînement. L'intérêt de ces mesures réside dans la possibilité de déterminer une sollicitation physiologique optimale pour chacun des postes, voire pour chaque joueur individuellement, en fonction des données recueillies lors des matchs et des entraînements. Toutefois, il est important de noter que les zones d'intensités utilisées dans les différentes études ne sont pas identiques, bien que proches, ce qui limite la possibilité d'établir précisément cette sollicitation optimale pour préparer les joueurs.

3.4 Actions de haute intensité

Dans l'objectif de mieux comprendre les exigences physiques de l'activité Handball, il est nécessaire de s'attarder par ailleurs sur l'analyse des actions à haute intensité. Celles-ci représentent l'ensemble des sauts, accélérations et décélérations et autres changements de directions qui nécessitent des efforts explosifs ponctuels. Ces actions se doivent d'être particulièrement étudiées parce qu'elles sont représentatives des moments décisifs des matchs. En effet, elles représentent des actions déterminantes sur le cours du jeu, notamment associées aux tirs ou mise en condition pour permettre le tir d'un coéquipier lors des phases offensives et les déplacements et tentatives de contres lors des phases défensives. Ainsi, bien qu'il n'y est pas de seuil reconnu pour déterminer l'intensité de ces événements, hormis dans le cas des accélérations et décélérations (Izzo and Sopranzetti 2010), il est couramment admis que

l'ensemble de ces événements détectés par les différents systèmes peuvent être considérés comme étant de haute intensité (Abdelkrim, et al. 2007, Harper, et al. 2019, Luteberget and Spencer 2017). En effet, Póvoas et al. (2009) ont dénombré un total de 117 ± 36 actions de ce type par joueur et par match lors de rencontres élite de première Ligue portugaise. Cette étude détaille ces actions selon les postes qui permet d'appréhender le fait que les arrières sont les joueurs présentant le plus de déplacements de haute intensité en général mais que ce sont les ailiers qui sprintent le plus. D'autre part les pivots sont les joueurs effectuant le plus de duels (cf. Figure 15). Par la suite, Michalsik et al. (2015.c) en ont dénombré une moyenne de 102 ± 6 actions par joueur et par match en première ligue danoise de Handball masculin. Celles-ci se répartissent en 58 actions de haute intensité par joueur en attaque et 44 en défense. Ces mêmes auteurs, dans une étude ultérieure portant sur les Championnat d'Europe masculin de 2016 ont montré une moyenne de 76 ± 124 accélérations et 66 ± 105 décélérations par joueur durant les matchs, ce qui confirme leur importance dans le volume d'activité des joueurs (Michalsik, et al. 2016). D'ailleurs, l'étude de Luteberget et al. (2017) a montré une moyenne de $3,90 \pm 1,58$ actions à haute intensité par minute de jeu (i.e., accélérations, décélérations et changements de direction, tous supérieurs à $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), chez les joueuses de Handball norvégiennes internationales.

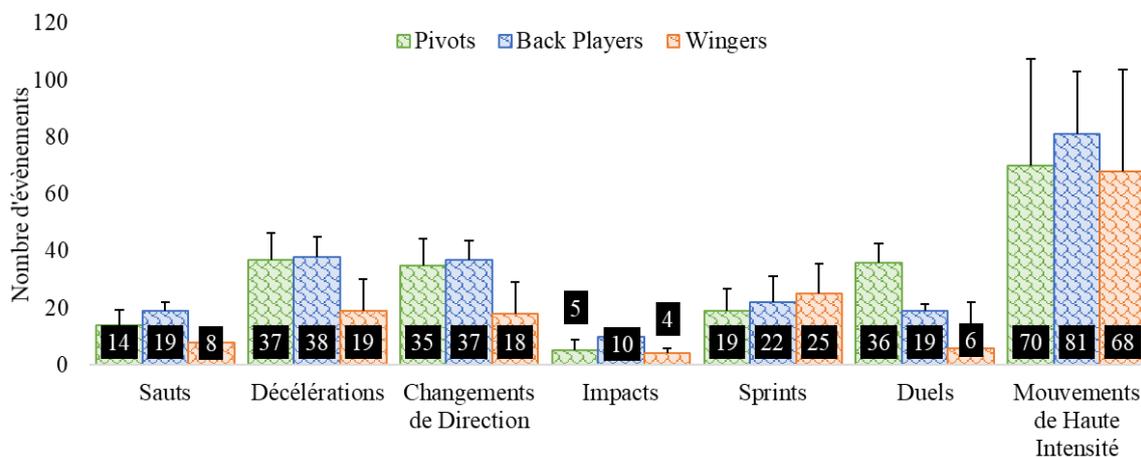


Figure 15 : Actions de Haute Intensité \pm SD (Nombre) d'après Póvoas et al. (2009) et Michalsik et al. (2015.c).

En dehors du nombre d'occurrences de ces actions à haute intensité, il est nécessaire d'analyser leur durée ainsi que le temps de récupération disponible entre chacun de ces événements. En effet, le Handball est une activité intermittente constituée de périodes brèves d'activités intenses entrecoupées de périodes de récupérations, dont la durée et l'intensité varient en fonction du jeu. Afin de caractériser l'aspect intermittent d'une activité, le calcul du ratio entre la durée des

phases d'activité intense et la durée des phases de récupération est généralement utilisé (Austin, et al. 2011, Cunniffe, et al. 2009, Lemmink and Visscher 2005, McLean 1992, Price and Halabi 2005). Peu d'études se sont intéressées à ce sujet au Handball. Chelly et al. (2011) sont les premiers à s'être interrogés sur le mode de répétition des efforts des joueurs de Handball, en étudiant l'activité de jeunes joueurs. Les résultats de cette étude indiquent une durée moyenne de course de $14,4 \pm 1,1$ s et un temps de récupération moyen de $19,5 \pm 0,9$ s entre deux courses. De plus, les auteurs montrent une moyenne de 133 ± 15 activités techniques spécifiques par match pour les joueurs, ce qui représente 22 % du temps de jeu. L'ensemble de ces actions représentent alors 501 ± 47 changements de rythme au cours d'un match, soit une fois toutes les 5,9 s. Toutefois, cette étude ne porte pas directement sur les actions à haute intensité. En effet, aucune distinction n'est faite dans cette étude entre les différentes actions selon leur intensité. Par ailleurs, dès 2012, l'étude de Póvoas et al. (2012) montrait que 63 ± 25 % des actions de haute intensité, représentées par des sprints et des courses rapides, sont entrecoupées de plus de 90 s de récupération. D'après cette étude, les arrières sont les joueurs effectuant le plus d'actions à haute intensité puisqu'elles représentent 67 ± 22 % du total de leurs actions. Les ailiers sont très proches avec 63 ± 18 %, tandis que les pivots n'en présentent que 57 ± 24 %. Les temps de récupérations entre ces actions de haute intensité ont également été mesurés durant cette étude, et montrent que 9 ± 8 % de celles-ci sont séparées de 61 à 90 s, 11 ± 12 % de 31 à 60 s et 18 ± 18 % de moins de 30 s. Les arrières sont aussi les joueurs enchaînant le plus d'actions de haute intensité avec un temps de récupération inférieur à 30 s, avec 18 ± 16 % de leurs actions se rangeant dans cette catégorie, là où les ailiers n'en présentent que 13 ± 13 % et les pivots 19 ± 17 %. L'étude de Luteberget et al. (2017) a aussi mis en évidence que les joueuses n'intervenant que sur les phases offensives, présentent une activité supérieure avec 1,7 actions de haute intensité de plus par minute de jeu, comparativement aux joueuses participant à la fois à l'attaque et à la défense. Toutefois, il est fort possible que ces actions supplémentaires représentent les sprints effectués pour rejoindre le banc à la fin de l'attaque, puisque les phases de défense et d'attaque alternent toutes les 22 à 36 s (Karcher and Buchheit 2014). Cependant, contrairement aux joueurs participant à toutes les phases de jeu, leur temps de récupération est nécessairement plus long. Ce résultat indique que la majorité des actions de haute intensité s'effectuent lors des phases offensives, ce qui est contradictoire avec les résultats de l'étude de Póvoas et al. (2014) qui indiquaient que la majorité des actions de haute intensité avaient lieu en défense. Cette différence dans les résultats peut s'expliquer par plusieurs facteurs.

Premièrement, les sujets d'études diffèrent à la fois en termes de sexe (homme-femmes) et de niveau (national portugais, nation émergente du Handball mondial, et international norvégien, parmi les meilleures nations du Handball mondial). En second lieu, le système d'analyse est différent passant d'un système vidéographique notationnel dans l'étude de Póvoas et al. (2012) à un système LPS dans l'étude de Luteberget et al. (2017). Enfin les règles du Handball ont changé en 2016, en permettant le remplacement du gardien par un joueur de champ, ce qui modifie l'activité des joueurs en attaque et en défense. Ainsi, au regard des études ayant porté sur le sujet, il est difficile d'appréhender la fréquence, la durée et la répartition des phases de récupération disponibles pour les joueurs durant un match de Handball. Néanmoins, ces études ont permis de mieux apprécier la nature intermittente de haute intensité de l'activité Handball, et surtout de préciser les besoins spécifiques des joueurs selon leurs postes. En effet, il ressort trois résultats principaux de l'ensemble de ces études. Premièrement les ailiers sont les joueurs présentant les actions de plus haute intensité mais aussi les joueurs qui en effectuent le moins. Cela implique qu'ils bénéficient d'un temps de récupération moyen plus long. Deuxièmement, les arrières présentent le plus grand nombre d'actions de haute intensité, ce qui fait d'eux les joueurs ayant le temps de récupération le plus court. Toutefois, ces actions sont globalement d'intensité inférieure à celles des ailiers. Enfin troisièmement, les pivots effectuent légèrement moins d'actions de haute intensité que les arrières, ce qui leur laisse un temps de récupération moyen assez similaire à celui des arrières. Toutefois, il s'agit des joueurs ayant les intensités de déplacement les plus faibles. Il est important de nuancer ces résultats au regard de la position du pivot qui, étant placé au cœur de la défense adverse, ne peut disposer de la même liberté de mouvement que les autres joueurs. Cela se traduit par un plus grand nombre de duels que ces joueurs doivent mener au cours d'un match, comme le montre l'étude de Póvoas et al. (2009). De plus, comme nous l'avons vu, les pivots sont les joueurs effectuant le plus de rotations par match, 27 ± 6 , soit plus du double des arrières, 13 ± 9 , et neuf fois plus que les ailiers, 3 ± 2 (Karcher and Buchheit 2014). Dans la mesure où ce poste génère un plus grand nombre de rotations par rapport aux autres, il est possible que l'activité des pivots ne puisse se résumer aux actions et distances parcourues à haute intensité. C'est pourquoi il est nécessaire de pouvoir analyser l'activité des joueurs de manière plus précise.

3.5 Intensité de l'activité

L'ensemble des données présentées jusqu'ici permettent d'appréhender assez précisément le volume d'activité des joueurs de Handball en compétition, la manière dont il se répartit selon les différentes catégories de déplacements, ainsi que les actions de haute intensité qui le constituent. Toutefois, très peu d'information n'a pour le moment été fournie concernant l'intensité produite par les joueurs durant les matchs. Bien que ces données soient particulièrement pertinentes pour les entraîneurs et préparateurs physiques dans l'objectif de préparer les joueurs aux exigences de la compétition, les études portant sur le sujet en Handball sont peu nombreuses. Nous n'avons recensé que cinq études, détaillant l'intensité de l'activité des joueurs selon leurs postes, utilisant les analyses vidéographiques notationnelles (Cardinale, et al. 2017, Luig P. 2008, Michalsik 2015, Póvoas 2009, Šibila 2004) et une étude utilisant un outil LPS (Manchado, et al. 2021). Ces études présentent toutefois des résultats assez variés, notamment en raison de la grande variété des publics étudiés (cf. Figure 16 & Figure 17). En effet, ces études portent respectivement sur des matchs amicaux, des matchs de première ligue portugaise et danoise et des matchs de championnat du monde et d'Europe. Or, comme nous l'avons déjà dit, les niveaux de jeu et les contextes sont très hétérogènes, ce qui peut tout à fait expliquer les différences de résultats. Les études de Luig et al. (2008), Cardinale et al. (2017) et Manchado et al. (2021) ont proposé de distinguer le poste de demi-centre des deux autres arrières latéraux et ont démontré une activité d'intensité supérieure pour ce poste (cf. Figure 16 & Figure 17). La distinction faite, par Cardinale et al. (2017) et Manchado et al. (2021), entre les joueurs selon leur latéralité ne montre pas pour autant de différence majeure entre ces joueurs en termes d'intensité de jeu. L'étude de Šibila et al. (2004) présente également les vitesses moyennes de déplacements des joueurs durant les matchs. Les résultats montrent que les ailiers ont une activité moyenne plus importante avec $1,60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ que les arrières ($1,43 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), les pivots ($1,34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) et les gardiens ($0,73 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Cette analyse confirme que le poste d'ailier est celui présentant l'intensité de déplacement la plus importante, ce qui est cohérent avec le fait qu'ils soient les joueurs parcourant le plus de Distance à Haute Vitesse (DHV). Toutefois, il n'est ici question que de distance parcourue par minute de jeu et de vitesse moyenne, ce qui ne permet pas de prendre en compte l'intensité déployée par les joueurs lors d'évènements ponctuels, tels que les sauts, les contacts ou les duels.

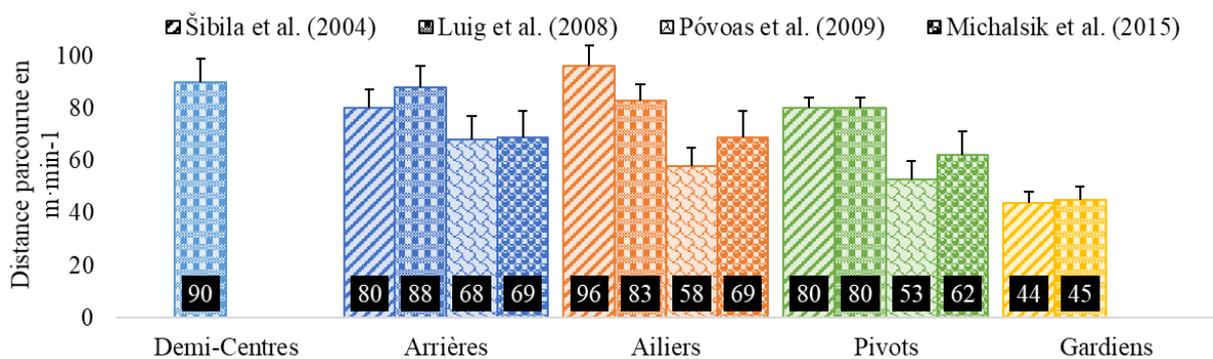


Figure 16 : Intensité de l'activité des joueurs selon leur poste, DTp par minutes \pm SD (en $m \cdot \text{min}^{-1}$) d'après Šibila et al. (2004), Luig et al. (2008), Póvoas et al. (2009) et Michalsik et al. (2015.a).

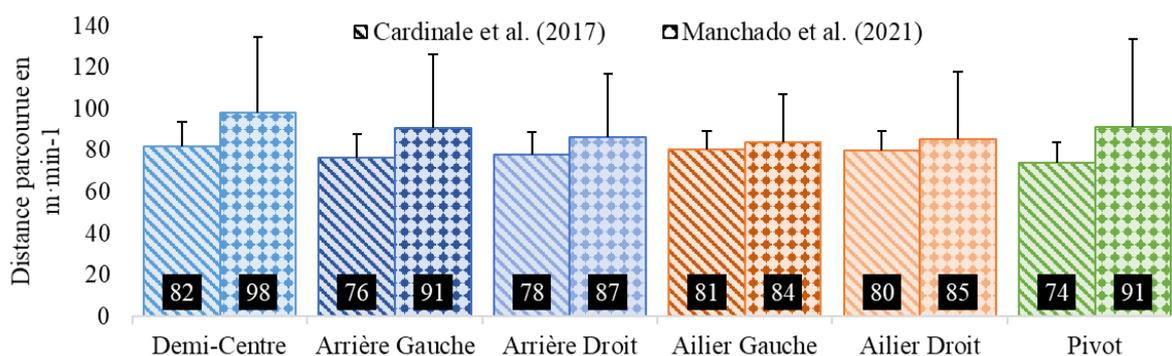


Figure 17 : Intensité de l'activité, DTp par minutes \pm SD (en $m \cdot \text{min}^{-1}$) des joueurs selon leur poste et leur latéralité d'après Cardinale et al. (2017) et Machado et al. (2021).

3.6 Pics d'intensité

Bien que l'ensemble des études détaillées jusqu'alors soient pertinentes pour estimer l'intensité de l'activité des joueurs durant les matchs, elles ne renseignent ni sur l'évolution de cette intensité au cours du match, ni sur l'intensité maximale atteinte durant les compétitions. La première étape dans la recherche de l'intensité maximale produite par les joueurs durant les matchs a été de séquencer ces derniers en segments de 5 à 10 minutes et d'étudier l'activité des joueurs durant ces segments. Michalsik et al. (2015.b) se sont donc intéressés à l'évolution de la distance parcourue au cours du match en le séquencant en segments de 5 minutes. Les résultats de cette étude montrent que les joueurs ont une activité d'intensité maximale au début du match avec 366 ± 53 mètres parcourues lors des 5 premières minutes puis celle-ci décroît tout au long de la première période jusqu'à 235 ± 72 mètres lors des 5 dernières minutes. Lors de la seconde période, l'activité des joueurs est toujours inférieure à celle de la première période, hormis lors des 10 dernières minutes du match (cf. Figure 18). Bien que l'analyse de ces différents segments nous renseigne plus sur l'évolution de l'activité et donc sur l'état physique des joueurs, il est tout de même intéressant de noter que ce regain d'activité en fin de

match peut s'expliquer par divers facteurs. Le score et son évolution au cours de la rencontre, le fait de jouer à domicile ou à l'extérieur (Miguel A. Gómez 2014, Oliveira, et al. 2012), ainsi que la notion de "money-time", comme le précisent les auteurs dans leur étude, peuvent être des facteurs explicatifs de cette évolution de l'activité. En effet, la fin de match est souvent décisive en sport collectif, ce qui peut amener les joueurs à s'investir plus complètement pour remporter le match. De plus, des études menées dans d'autres sports que le Handball ont mis en évidence des stratégies de gestion de rythme mises en place par les athlètes, notamment dans le but de minimiser le nombre de perturbations physiologiques lorsqu'ils récupèrent après un exercice intense. Ces stratégies permettent d'expliquer, au moins en partie, cette répartition de l'activité durant les matchs (Abbiss and Laursen 2008, Foster, et al. 1994, Furlan, et al. 2015).

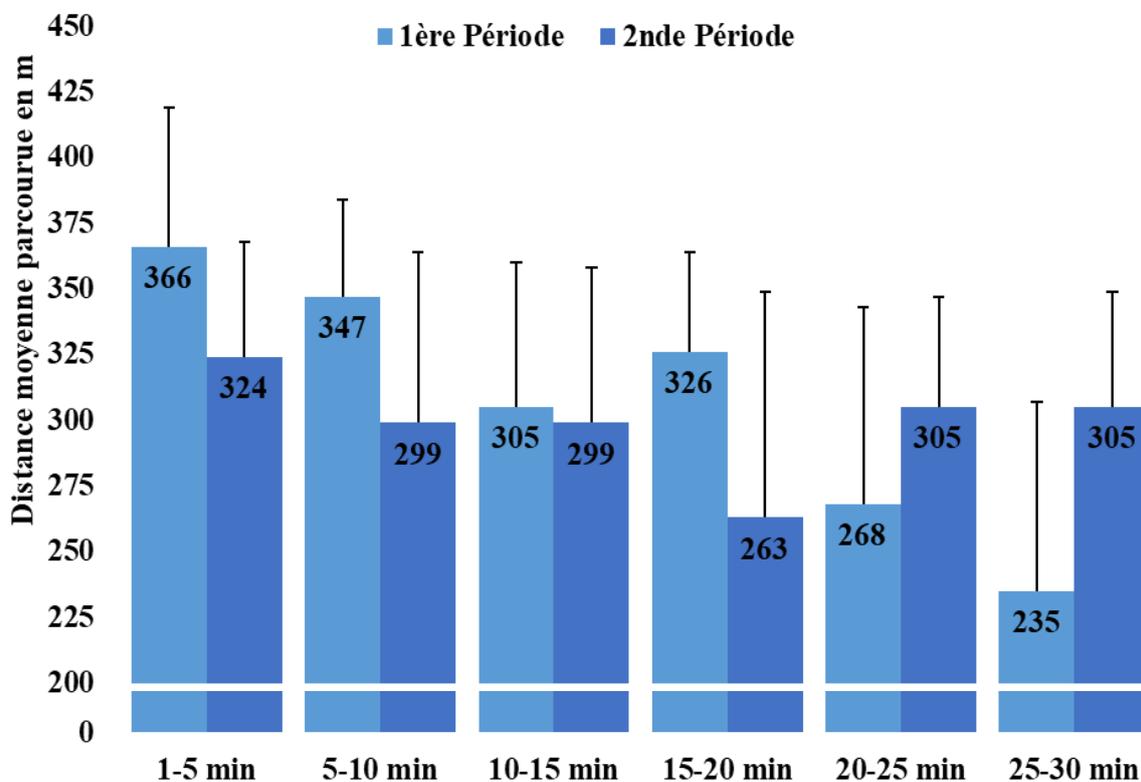


Figure 18 : Répartition de l'activité moyenne, DTp \pm SD par périodes de 5 minutes d'après Michalsik et al. (2015.b).

Cette étude, de Michalsik et al. (2015.b), a également mise en évidence que les 5 premières minutes de la première période sont les plus intense en termes de déplacement et les 5 dernières minutes de la première période, les moins intenses, tandis que les 10 dernières minutes du match sont des périodes avec encore une grande activité, malgré la fatigue accumulée durant le match (cf. Figure 18). Ces analyses de l'évolution de l'activité produite par les joueurs durant les matchs par tranche de 5 minutes constituent un premier niveau permettant de comprendre

l'évolution de l'intensité des rencontres. Toutefois, cette méthode, basée sur des segments de durée déterminée, peut sous-estimer considérablement les exigences de courses des périodes les plus intenses des matchs (Casamichana, et al. 2012, Gabbett 2010, Gabbett and Mulvey 2008). Les différentes sollicitations, en matière de courses et d'actions à haute intensités, observées lors des compétitions de sports collectifs suggèrent que les analyses globales des exigences en matchs peuvent ne pas refléter de manière adéquate les pics d'intensité vécus par les joueurs durant ceux-ci (Austin and Kelly 2013, Carling and Dupont 2011, Kempton, et al. 2013). Il a été suggéré que les baisses de performance de courses observées en sports collectifs peuvent être le résultat d'une fatigue progressive et transitoire ressentie tout au long d'un match (Mohr, et al. 2003). Cependant, ces affirmations sont souvent basées sur des données collectées à partir de périodes de jeu prédéfinies, telles qu'utilisé par Michalsik et al. (2015.b). Il se peut que la période la plus intense d'un match ne se situe pas entièrement dans l'un de ces blocs, et donc que ces méthodes sous-estiment les exigences de la compétition en matière de course. Pour tenir compte de ce paramètre, Varley et al. (2012.a) ont utilisé une méthode de moyenne mobile pour déterminer la distance maximale parcourue à vitesse élevée ($> 15 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), durant un bloc de 5 minutes, au cours d'un match de Football d'élite, pour le comparer à la méthode traditionnelle des blocs de 5 minutes. Cette technique d'analyse correspond au calcul de l'intensité maximale à l'aide d'une moyenne mobile, c'est à dire recalculée de façon continue, en utilisant à chaque calcul un sous-ensemble d'éléments (ici 5 minutes de données) dans lequel un nouvel élément remplace le plus ancien. Le procédé est répété sur l'ensemble de la durée du match, puis l'intensité maximale mesurée parmi l'ensemble de ces mesures effectuées est conservé pour définir l'intensité maximale atteinte. Les auteurs ont alors observé que la méthode traditionnelle sous-estimait de 20 à 25 % la distance maximale parcourue à haute vitesse, ce qui suggère que la méthode de la moyenne mobile est plus à même de distinguer la période de course la plus intense du match (Varley, et al. 2012a). L'utilisation d'une méthode de moyenne mobile a donc permis aux chercheurs d'identifier la période de compétition la plus intense pour une durée de moyenne mobile prédéfinie. Ces données ont une application pratique importante pour la prescription de l'entraînement, notamment en permettant aux entraîneurs de contrôler les exercices d'entraînement en fonction de ces exigences de match. Néanmoins, cette approche ne permet que très partiellement de réguler l'organisation des entraînements puisqu'elle ne fournit des informations que sur des durées moyennes de mouvement prédéterminées (généralement 5 minutes). C'est pourquoi, à partir de ces analyses, Delaney et

al. (2015) ont proposé une nouvelle méthode permettant de mesurer l'intensité maximale des matchs, exploitée en Rugby et reprise en Football. Pour cela, l'intensité déployée par les joueurs est mesurée à l'aide de différentes moyennes mobiles tout au long du match pour mettre en évidence les exigences maximales de l'activité (cf. Figure 19). La différence principale entre cette méthode et celle employée par Varley et al. (2012a) réside dans la répétition des mesures à l'aide de différentes moyennes mobiles permettant alors de définir l'évolution de l'intensité selon la durée analysée. Il est alors possible d'obtenir une représentation graphique de la décroissance de l'intensité déployée avec l'allongement de la période d'étude (cf. Figure 19, gauche). La régression logarithmique des données obtenues permet de mettre en évidence une relation directe entre l'intensité déployée et la durée d'analyse, à condition que les données suivent bien une loi de puissance. Cela se traduit par une droite dont il est alors possible de mesurer l'ordonnée à l'origine représentant l'intensité maximale théorique, correspondant au pic à 1 minute ($\text{Log}(1) = 0$), ainsi que la pente représentant la vitesse de décroissance. Ces informations sont importantes en ce qu'elles permettent aux entraîneurs et préparateurs physique d'avoir accès à des données précieuses pour la prescription et le suivi des joueurs pendant les exercices d'entraînement. Toutefois, les exigences, ainsi mesurées, reflètent le bloc de course le plus intense effectué pendant toute la durée d'un match. Par conséquent, il est recommandé que les exigences en matière de course à pied prescrites lors des entraînements fassent partie d'un programme de conditionnement physique correctement périodisé (Delaney, et al. 2015, Delaney, et al. 2017a, Delaney, et al. 2017b).

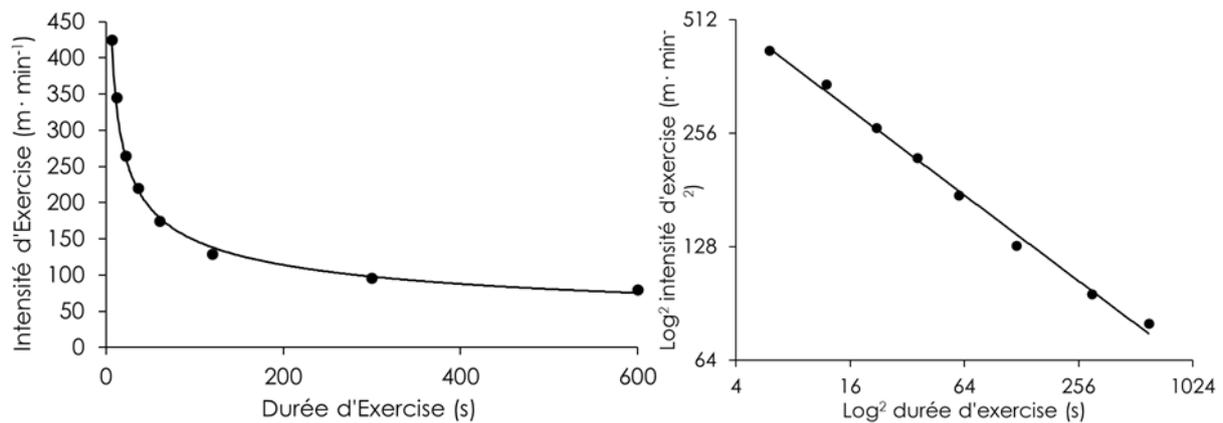


Figure 19 : Exemple d'analyse de loi de puissance modélisant la relation entre l'intensité de l'exercice d'après Delaney et al. (2015). À gauche : vitesse moyenne (m·min⁻¹) tracée pour chaque durée d'exercice moyenne mobile de 5 - 600 secondes. À droite : Régression logarithmique permettant d'obtenir une relation linéaire.

Malheureusement ce type d'étude n'a pas encore été mené en Handball, or une telle étude permettrait aux entraîneurs de se baser sur une quantification rigoureuse (et optimale à ce jour) des exigences maximales des joueurs en match. Bien que les résultats issus de cette méthode ne reflètent que les exigences de course de la compétition, sans quantification ni des contacts ni des actions de haute intensité, cela permet de les reproduire durant des exercices de conditionnement sur le terrain. En outre, pour mieux reproduire la nature du Handball, les entraîneurs peuvent recourir à des méthodologies plus spécifiques telles que les jeux à effectif réduit durant lesquels il est possible d'adapter les règles pour ajuster l'intensité attendue comme nous le verrons dans la partie suivante.

3.7 Bilan

Pour résumer cette partie, nous pouvons dire que l'activité Handball a, pour le moment, été bien caractérisée en termes de volume d'activité, avec une connaissance fine de l'activité de chacun des postes, mais reste parcellaire dans l'analyse de l'intensité déployée durant les matchs. En effet, les différentes études menées sur l'activité ont mis en évidence les spécificités des différents postes concernant le volume des déplacements mais à ce jour les connaissances sur leur intensité sont très limitées. Les quelques études ayant porté sur le sujet ne permettent pas d'appréhender l'intensité maximale réellement déployée par les joueurs, et encore moins de comprendre les différences entre les postes. Néanmoins, les études concernant le volume d'activité des joueurs ont mis en évidence la spécificité des ailiers. Ces derniers présentent des exigences supérieures aux autres postes en termes de capacité à effectuer des courses à haute vitesse. Par ailleurs, les études ayant détaillé le volume des déplacements spécifiquement pour

les joueurs de la base arrière ont montré une spécificité du poste de demi-centre, qui déploient une activité plus importante que les arrières latéraux. Ceci est corroboré par l'analyse des événements à haute intensité qui sont également plus nombreux à ce poste, notamment les accélérations et décélérations. Ceci est compréhensible du fait du rôle de meneur de jeu de ce poste, qui initie donc les enclenchements offensifs. Toutefois il est important de noter que l'évolution actuelle du Handball a tendance à homogénéiser l'activité de postes de la base arrière, avec une responsabilité de meneur de jeu de plus en plus partagée entre ces trois joueurs. Enfin, il est également important de noter que l'analyse de l'activité des joueurs en match à l'aide des mesures de déplacements ne permet pas de comprendre la spécificité du poste de pivot puisque celui-ci semble équivalent au rôle des arrières latéraux, avec moins d'événements de haute intensité que ces derniers. Sur l'ensemble de ces études, la seule mesure présentée jusqu'alors permettant de comprendre la spécificité de ce poste est la quantification des duels et des contacts, pour lesquels les pivots sont prédominants. Il ressort donc le besoin de trouver d'autres paramètres permettant de mieux comprendre les spécificités de ce poste qui s'organise autour d'une activité principalement isométrique, ou à faible déplacements. Concernant l'analyse de l'intensité de l'activité des joueurs, les études actuelles ont permis de définir l'activité moyenne par poste qui se traduit par une activité globalement similaire pour tous les joueurs de champs. Il est néanmoins indispensable d'aller plus loin dans la caractérisation de cette intensité afin de comprendre si des différences existent entre les postes, et surtout de comprendre la fluctuation de celle-ci au cours du match. Concernant cette évolution au cours du temps, les études ayant proposé ce type d'analyse ont mis en évidence des pics d'activités en début de chaque période ainsi qu'un regain d'activité en fin de match. Cette organisation peut avoir des origines diverses qui mériteraient d'être analysées plus en profondeur. Toutefois, au-delà de tout cela, il est primordial pour la préparation physique des joueurs aux exigences de la compétition qu'une analyse de l'intensité maximale déployée par les joueurs soit effectuée, comme cela a pu être fait dans le Football ou le Rugby. En effet, l'apport de cette connaissance est indiscutable pour les entraîneurs et les préparateurs physique afin de pouvoir améliorer leur travail par une meilleure compréhension des exigences de l'activité et donc une meilleure préparation à celles-ci.

4. DÉFINITION DE LA CHARGE D'ENTRAÎNEMENT EN SPORTS COLLECTIFS

L'évaluation des différents aspects de l'entraînement qui peuvent aider à mieux comprendre leur impact sur les athlètes est l'objectif ultime des entraîneurs et des scientifiques du sport depuis des décennies (Buchheit 2016). Les raisons d'un tel intérêt résident dans la nécessité d'un entraînement individualisé, y compris dans le cadre des sports collectifs, pour améliorer les performances et réduire le risque de blessures (Lacome, et al. 2018a). Dans ce but, l'analyse de la CE est une méthode largement répandue dans les sports collectifs (Hardin, et al. 2012, Impellizzeri, et al. 2019). Cette charge est une mesure représentative de l'activité des joueurs, à la fois durant les différentes sessions d'entraînement et durant les matchs. Elle se divise en deux catégories, avec d'une part la charge interne et d'autre part la charge externe (Bourdon, et al. 2017, Cardinale, et al. 2017, Impellizzeri, et al. 2005, Wallace, et al. 2014).

La charge interne, est une mesure du stress physiologique et psychologique imposé au joueur. La charge externe est une mesure indépendante de la charge interne, correspondant à la mesure de la quantité de travail physique effectué par l'athlète (Virus and Virus 2000, Impellizzeri, Rampinini et al. 2005). La CE globale des athlètes est, par conséquent, impactée par l'ensemble des sessions de travail, qu'il s'agisse des entraînements spécifiques à l'activité, des séances de musculation spécifiques ou des matchs. En conséquence, c'est bien au niveau des différentes séances d'entraînements, physiques et spécifiques, que l'entraîneur et le préparateur physique peuvent agir pour réguler la CE de chacun des joueurs (cf. Figure 20). Pour cela, il est nécessaire d'adapter les paramètres structurels, à savoir le volume, l'intensité et la fréquence des séances (Wenger and Bell 1986). Cette dissociation entre charges internes et externes revêt une grande importance dans le cadre des sports collectifs, car il n'est pas rare de constater des différences notables entre les joueurs malgré l'utilisation préférentielle d'exercices réunissant l'ensemble de l'équipe (Impellizzeri, Rampinini et al. 2005, Akubat, Patel et al. 2012, Manzi, Bovenzi et al. 2013, Arcos, Martínez-Santos et al. 2015). En effet, l'organisation des sports d'équipe autour de postes spécifiques engendre inévitablement des différences entre les joueurs au niveau de la charge externe produite. De même, du fait des différences inter-individuelles, une même charge externe peut être vécue inégalement par les joueurs et donc induire une charge interne distinctive (Jaspers, et al. 2017).

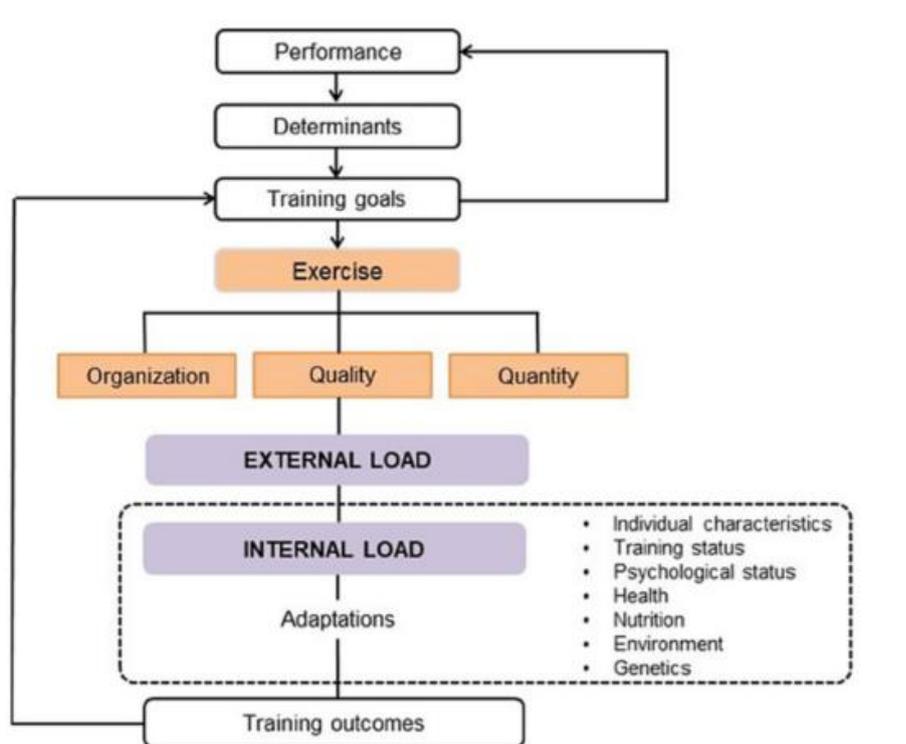


Figure 20 : Cadre théorique du processus d'entraînement d'après Impellizzeri et al. (2019).

4.1 Mesures internes

4.1.1 Mesures subjectives

La solution la plus largement utilisée et la plus documentée dans la littérature scientifique pour quantifier la Charge d'entraînement interne (CEi) induite par les différentes sessions (i.e., musculation, entraînements spécifiques et compétition) est la méthode basée sur l'évaluation de l'effort perçu (RPE, pour *rating of perceived exertion*). Cette méthode de calcul de la CE interne est définie comme subjective parce qu'elle s'appuie sur une échelle de notation de l'intensité perçue par le joueur de la séance. Cela est représentatif de la façon dont l'athlète a vécu la session et donc de l'impact physiologique que celle-ci aura sur lui. Différentes échelles de notation ont été proposées au cours du temps (Borg and Borg 2002, Borg, et al. 1987, Foster, et al. 1995), mais aujourd'hui la méthode CR-10, basée sur l'échelle de Borg modifiée, (Foster, et al. 2001) est la plus largement répandue (cf. Figure 21). Il s'agit d'ailleurs de la méthode la plus étudiée au regard du nombre de publications portant sur le sujet, dans de nombreux sports collectifs (Akenhead, et al. 2016, Bartlett, et al. 2017, Campos de Souza, et al. 2021, Conte, et al. 2021, Debien, et al. 2018, Dello Iacono, et al. 2018, Gabbett and Jenkins 2011, Kniubaite, et al. 2019, Robineau, et al. 2020, Ryan, et al. 2021, Svilar, et al. 2018). Sa diffusion dans le

monde du sport est principalement due à sa simplicité d'utilisation, son faible coût à la fois financier et temporel, et sa validation scientifique (Impellizzeri, et al. 2004). Afin d'obtenir une évaluation de la séance il est aussi possible de multiplier le volume de la séance (i.e., durée, spécifique à chaque athlète) par son intensité (i.e., note subjective de chaque athlète), ce qui donne une valeur en unité arbitraire (u.a). Ce calcul permet d'obtenir ce que l'on appelle la sRPE (pour *session rating of perceived exertion*) qui a le mérite, par rapport à la simple perception personnelle de l'effort (RPE) qui ne rend compte que l'intensité ressentie de la session, d'informer de manière générale sur la CE globale du sportif. L'idée fondamentale à l'origine de cette méthode est que la RPE est un indicateur fiable de l'intensité vécue de l'exercice. En effet, il a été démontré qu'il est possible d'établir des relations entre des indicateurs physiologiques, tels que la Fréquence Cardiaque (FC) et le lactate sanguin, qui sont des marqueurs forts de l'intensité vécue des exercices, et l'évaluation subjective (Foster, et al. 1995). Foster et al. (2001) ont d'ailleurs mis en évidence que cette méthode est particulièrement adaptée pour l'évaluation des exercices à haute intensité qui restent plus difficilement évaluables par des méthodes plus classiques comme la mesure de la FC. Ainsi, la mesure de la charge interne à l'aide de la perception de l'effort offre un outil intéressant et facile à mettre en place permettant de réguler la CE.

0	Repos
1	Très facile
2	Facile
3	Modéré
4	Légèrement difficile
5	Difficile
6	-
7	Très difficile
8	-
9	Très très difficile
10	Effort maximal

Figure 21 : Échelle RPE de Borg (CR-10), d'après Borg (1987).

Une unique étude a pour le moment été menée en Handball sur la caractérisation de la CEi durant les périodes de compétitions, à partir de données subjectives. Cette étude de Clemente et al. (2019) a montré une augmentation de la CEi et une diminution des niveaux de bien-être lors des semaines classiques par rapport aux semaines chargée (présentant un enchaînement de matchs à trois jours ou moins d'intervalle), en particulier à deux et trois jours du match suivant.

Par ailleurs les auteurs ont pu mettre en évidence une CEi plus importante à deux et trois jours du match suivant que la veille de match, alors que ce dernier entraînement avant les matchs présentait des valeurs plus importantes de douleurs musculaire et de fatigue. Ainsi les résultats de cette étude sont similaires à ce qu'il a pu être montré dans d'autres sport comme le Football ou le Rugby. Cette étude, bien que caractérisant pour la première fois l'évolution de la CEi au Handball, reste uniquement descriptive et surtout ne s'appuie que sur des données subjectives. Or, cette méthode ne permet pas de distinguer la part de la charge interne liée aux contraintes cardio-vasculaires (répétition d'efforts de haute intensité) et la part liée aux contraintes biomécaniques (accélération, changements de direction, sprints, sauts et collisions) puisqu'elle est une évaluation, par l'athlète, de la séance dans sa globalité. Il est donc nécessaire de rechercher des méthodes de quantification de la charge interne permettant de définir la CE en fonction de ce qu'elle induit comme coût pour l'organisme selon le type de contraintes (Vanrenterghem, et al. 2017). À ce titre, certaines recherches proposent de faire la distinction entre les efforts perçus au niveau respiratoire et musculaire (Arcos, et al. 2014, Gil-Rey, et al. 2015, Weston, et al. 2015). D'autres chercheurs proposent une évaluation par exercice pour mieux différencier les efforts (Hourcade, et al. 2017). Cependant toutes ces méthodes présentent l'inconvénient d'être plus difficile à mettre en place et n'ont pas fait l'objet d'analyse approfondie quant à leur validité expérimentale. De ce fait, le recours à des mesures objectives de la CEi constitue une source d'information plus fiables pour les entraîneurs.

4.1.2 Mesures objectives

En dehors des méthodes subjectives, telles que présentées précédemment, et afin de contourner les limites énoncées il est, en effet, possible de recourir à des mesures objectives de la CEi pour obtenir des informations sur ce qui relève des contraintes cardio-vasculaires ou biomécaniques. En premier lieu, la mesure de la FC permet d'apprécier la contribution de la filière aérobie lors d'une grande diversité d'exercices. Différentes études ont été menées en Handball pour définir l'impact de la pratique de ce sport sur la FC (Buchheit, et al. 2009b, Chelly, et al. 2011, Delamarche, et al. 1987, Kniubaite, et al. 2019, Michalsik, et al. 2015). Afin de mesurer la CEi associée à l'activité, diverses méthodes sont disponibles, notamment la mesure de la FC_{max} et de la FC moyenne, et le temps passé à différents pourcentages de FC_{max}. Ces études ont notamment permis de montrer que les joueurs passent en moyenne 70 % de leur temps de jeu au-dessus de 170 Battement par minutes (Bpm) avec une moyenne à 172 ±2 Bpm. L'analyse

de la distribution de cette FC a permis de montrer une moyenne de 28% du temps de jeu effectif passé en dessous de 65% de la FC_{max} , 64 % du temps entre 65 et 85 % et 10 % du temps au-dessus de 85 % de FC_{max} (Chelly, et al. 2011, Delamarche, et al. 1987, Michalsik, et al. 2015). Toutefois ces mesures ne sont que des mesures indirectes de la CEi. Pour tenter de l'approcher, différentes procédures s'appuient sur la mesure de FC. La méthode « TRIMP » (Training Impulse) est la plus ancienne de ces méthodes (Banister and Calvert 1980, Banister and Hamilton 1985). Elle consiste à caractériser l'intensité des séances à partir de la FC de réserve, qui est la différence entre la FC_{max} et la FC de repos. Le pourcentage de FC de réserve est alors utilisé afin de décrire l'intensité des exercices. L'inconvénient majeur de cette méthode réside dans la nécessité de connaître à la fois la FC de repos, la FC_{max} et la FC moyenne durant les exercices. Un coefficient $K = e^{(1.92 \times FC \text{ de réserve})}$ représentant l'augmentation exponentielle de la lactatémie au cours de l'exercice complète l'équation (Banister and Hamilton 1985). Le problème majeur de cette méthode est qu'elle est basée sur la FC moyenne des exercices ce qui limite sa capacité à fournir des informations relatives aux efforts intermittents typique des sports collectifs comme le Handball (Impellizzeri, et al. 2005). Afin de rendre compte des variations d'efforts liés aux activités intermittentes comme le Handball, la méthode « SHRZ » (*Summated Heart Rate Zone*) (Edwards 1993) est plus efficace. Cette méthode calcule la charge de travail en fonction du temps passé dans chacune des 5 zones d'intensités prédéfinies. Celles-ci sont associées à un coefficient allant de 1 à 5, selon qu'elles sont plus ou moins proche de la FC_{max} . Le coefficient le plus élevé correspondant à la zone d'intensité la plus haute, la charge de travail est calculée, comme le nom de la méthode l'indique, par somme des valeurs obtenues en multipliant le temps passé dans chacune des zones par le coefficient correspondant. Cette méthode présente aussi l'avantage, par rapport à la méthode « TRIMP », de ne nécessiter que la FC_{max} ce qui facilite sa mise en place. De nombreuses études s'appuient sur ces méthodes pour quantifier la charge de travail interne (Aoki, et al. 2017, Buchheit, et al. 2018, Dalton-Barron, et al. 2018, Dello Iacono, et al. 2018, Dubois, et al. 2020, Lambert and Borresen 2010, Michalsik, et al. 2016, Thorpe, et al. 2017, Vanrenterghem, et al. 2017, Weaving, et al. 2017, Younesi, et al. 2021). L'analyse de la FC est aujourd'hui considérée comme pertinent et valide pour la mesure de la charge interne dans le cadre d'entraînement en endurance mais pas pour les entraînements en résistance (Impellizzeri, et al. 2019). Toutefois les mesures de FC ne sont pas les seules solutions existantes aujourd'hui pour calculer la CEi, bien qu'elles restent les solutions les plus simples et les moins contraignantes. En effet, bien qu'il s'agisse de méthodes

peu envisageables pour un suivi quotidien de la charge interne en sport collectif globalement et au Handball en particulier, des solutions de mesure de la consommation instantanée d'oxygène existent. Ces méthodes comme la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2max$) ou la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) au point de compensation respiratoire sont très efficaces pour la mesure de la CEi mais inadapté à la fois à un suivi quotidien et à la pratique de sport de contact comme le Handball du fait de la nécessité de porter des systèmes de mesure sur les voies respiratoires lors de la pratique (Impellizzeri, et al. 2019, Meyer, et al. 1999, Vollaard, et al. 2009). Des études ont travaillé sur la $\dot{V}O_2$ et la $\dot{V}O_2max$ en Handball, afin de déterminer les exigences physiologiques de l'activité (Buchheit, et al. 2009b, Delamarche, et al. 1987, Michalsik, et al. 2015, Rannou, et al. 2001). Michalsik et al. (2015) ont montré que l'activité des joueurs, quel que soit leurs postes, s'effectue, en moyenne, à $71 \pm 6 \%$ de leur $\dot{V}O_2max$, avec une activité globalement inférieure en seconde période ($66 \pm 6 \%$ contre $75 \pm 6 \%$ en première période). Toutefois il est important de comprendre que ces valeurs sont estimées à partir des données de FC, or Buchheit et al. (2009) ont montré que ce procédé sous-estime la $\dot{V}O_2max$ dans le cadre du Handball. De même, Delamarche et al. (1987) ont établi que les capacités aérobique des Handballeurs sont similaires à celle des athlètes d'endurance et des cyclistes, bien que, ramené au poids des sportifs, les Handballeurs présentes des capacités inférieures. D'autres méthodes existent pour quantifier la charge de travail interne mais ne sont absolument pas adaptées à une utilisation quotidienne du fait de leur principe de fonctionnement. C'est le cas notamment des méthodes avec prélèvement sanguin, comme la mesure de la lactatémie post exercice. Les études ayant porté sur le sujet en Handball ont pu déterminer l'évolution de celui-ci au cours et après les matchs (Chelly, et al. 2011, Delamarche, et al. 1987, Michalsik, et al. 2015, Rannou, et al. 2001). Chelly et al. (2011) ont montré que la concentration en lactate était plus important à la fin de la première période ($9.7 \pm 1.1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) qu'à la fin du match ($8.3 \pm 0.9 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$), tandis que Michalsik et al. (2015) ont montré des résultats inverse et des concentrations plus faible ($3,7 \pm 1,6$ contre $4,8 \pm 1,9 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$). Ces différences de résultats peuvent s'expliquer par les différentes méthodes de mesure de la concentration utilisée et la différence de public utilisé puisqu'il s'agissait d'adolescent dans le premier cas et d'adultes dans le second. Néanmoins ces différences de résultats ne permettent pas de conclure sur l'impact de l'activité sur les concentrations en lactate dans le sang. En raison de contraintes structurelles ces solutions n'ont pas pu être envisagées dans le cadre de ce travail

de recherche. En effet, qu'il s'agisse de mesure de la FC ou de la $\dot{V}O_2$, aucun système actuellement disponible n'est adapté à la pratique du Handball. Les ceintures servant à la mesure de la FC, qui ont pu être validées scientifiquement pour la pratique sportive (Dellal, et al. 2008), ne sont pas utilisables dans le cadre de la pratique du Handball du fait du placement du capteur sur le sternum, cible privilégiée pour les contacts en Handball. De même, afin de quantifier la $\dot{V}O_2$ durant la pratique il serait nécessaire de porter des systèmes de mesure des échanges gazeux sur le nez et la bouche incompatible avec la pratique du Handball, toujours en raison des contacts entre les joueurs. Enfin, les méthodes de mesures de la lactatémie ne permettent pas de les répéter quotidiennement afin de suivre son évolution sur le temps long (i.e. saison).

4.2 Mesures externes

4.2.1 Mesures instantanées de la position

Le développement des technologies portables de mesures et de suivi de la position instantanée, depuis la fin du XX^{ème} siècle, a permis la mise en place d'une quantification de la CE quotidienne, à partir de données objectives. C'est pourquoi, aujourd'hui, ces technologies (GPS & LPS) sont fortement appréciées par les préparateurs physiques et les scientifiques du sport pour mesurer et étudier l'activité des joueurs. Naturellement, comme nous l'avons vu précédemment, les sports collectifs d'extérieur ont été les premiers à en bénéficier durant les entraînements sur le terrain et les compétitions, grâce aux GPS (Bangsbo, et al. 1991, Richards 1999, Schutz and Chambaz 1997). Par la suite l'évolution des technologies a permis aux sports d'intérieur, comme le Handball, de mener des études similaires ainsi que d'établir un suivi de l'activité des joueurs, à l'aide des LPS (Blauberger, et al. 2021, Luteberget, et al. 2018a). Pour quantifier la CE, la DTp permet de définir le volume des sessions tandis que les distances parcourues dans différentes zones de vitesse (cf. Figure 22) et les accélérations renseignent sur la charge mécanique des séances (Bowen, et al. 2017, Colby, et al. 2014, Duhig, et al. 2016). Ainsi l'activité Handball a été bien caractérisée aujourd'hui au regard des informations rapporté dans la partie précédente (cf. 3. ANALYSE DE L'ACTIVITÉ DES JOUEURS LORS DES COMPÉTITIONS ÉLITES). Parmi les variables les plus utilisées dans les sports collectifs,

celles liées à la distance parcourue (i.e., totale et par palier de vitesse), à la FC et aux mesures accélérométriques sont les plus fréquemment utilisées (Adesida, et al. 2019, Akenhead and Nassis 2016, Cummins, et al. 2013, Harper, et al. 2019, Hausler, et al. 2016, Sarmiento, et al. 2014). La classification de Gray (Buchheit and Simpson 2017) établit une logique entre ces différentes variables. Ainsi le niveau 1 regroupe l'ensemble des distances parcourues dans différentes gammes de vitesses ; le niveau 2 représente tous les événements liés aux changements de vitesse - accélérations, décélérations, et changements de directions ; et le niveau 3 s'appuie sur tous les événements dérivés des capteurs inertiels/accéléromètres. Au regard de cette classification, les données de niveau 1 et 2 sont les plus utilisées par les entraîneurs et les scientifiques du sport.

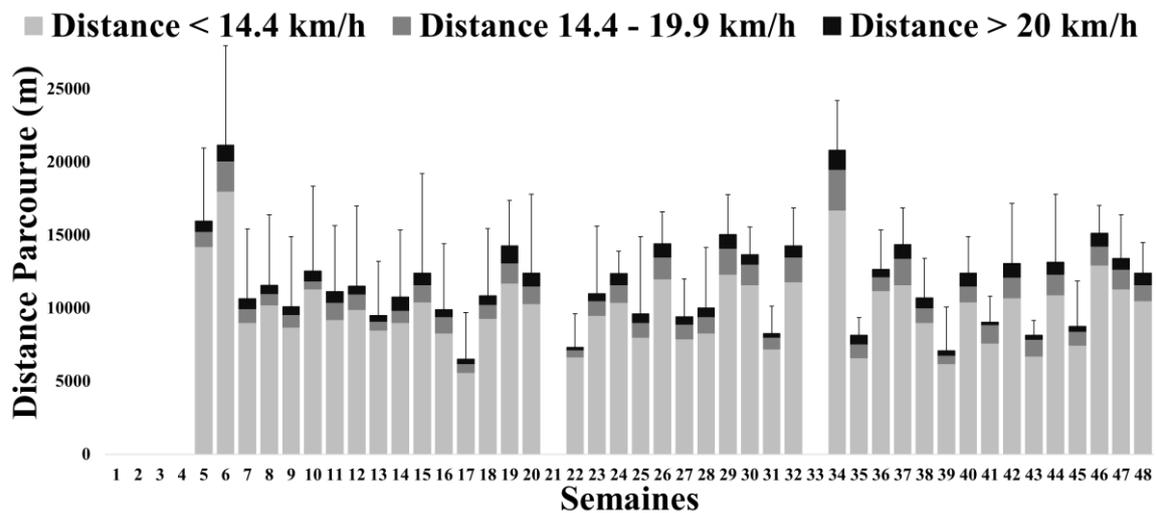


Figure 22 : Exemple de suivi de la CEe à partir des données de distance parcourue d'après Dubois et al. (2020).

Cependant, il a été démontré que les schémas locomoteurs des joueurs sont plus fortement influencés par des variables contextuelles (par exemple, les règles du jeu, l'intervention des entraîneurs, le score, les exercices utilisés) que par leur état de forme lors de la mesure (Carling 2013). Cela suggère donc que les variables liées à la locomotion (niveaux 1 et 2) ne sont certainement pas les plus appropriées pour contrôler directement la CE des joueurs. Pour compenser les limites des variables de niveau 1 ou 2 de la classification de Gray il est tout de même possible d'effectuer le suivi de la CE en analysant la tendance intra-joueur en comparant les données d'un même joueur sur plusieurs jours. D'autre part, il est possible de comparer les données d'un joueur avec l'ensemble ou une partie de l'équipe. Cette dernière option est la plus pertinente dès lors que l'on regroupe les joueurs selon leur activité sur le terrain (i.e., poste équivalent, attaque-défense etc.). Toutefois, malgré le large champ d'actions couvert par les

différentes variables exploitables par les systèmes LPS et GPS, certains paramètres de l'activité sportive ne peuvent être pris en compte de cette façon, comme les contacts et toutes sortes d'actions très spécifiques ne nécessitant que peu de déplacements de la part des joueurs (Dello Iacono, et al. 2018, Scantlebury, et al. 2020, Scott, et al. 2013). Pour cela il est nécessaire de s'appuyer sur les variables de niveau 3 de la classification de Gray, qui peuvent fournir des informations relatives à la CE des joueurs non associée à des déplacements.

4.2.2 Mesures accélérométriques

L'intégration des accéléromètres, dans les systèmes GPS et LPS a permis d'augmenter le nombre et la qualité des données fournies par ces systèmes afin de mesurer et évaluer la Charge d'entraînement externe (CEe) produite par les joueurs. De nombreuses variables de niveau 3 selon la classification de Gray, ont été définies à cet effet comme la « *Dynamic Stress Load* » (Gaudino, et al. 2015), la « *New Body Load* » (Ehrmann, et al. 2016), la « *Force Load* » (Colby, et al. 2014), ou encore le « *PlayerLoadTM* » (Boyd, et al. 2013), et dernièrement l'« *Accel'RateTM* » (Hollville, et al. 2021). Ces paramètres décrivent principalement une mesure cumulative ou sommative des accélérations et sont des substituts précieux des accélérations segmentaires et, dans une moindre mesure, de la charge mécanique du corps entier (Nedergaard, et al. 2017). L'ensemble de ces paramètres cherchent à représenter la quantité de mouvement déployée par les joueurs, qui serait une représentation pertinente de la CEe, mais sont définis par des méthodes de calcul différentes et peuvent donc aboutir à des informations différentes. Nous nous attarderons sur deux d'entre eux, à savoir le *PlayerLoadTM* et l'*Accel'RateTM*. Le premier parce qu'il est le plus cité dans les études scientifiques ayant porté sur l'analyse de la CEe, et le second car nous l'avons choisi pour nos études durant ce travail de thèse.

Le *PlayerLoadTM* se définit donc comme suit (Boyd, et al. 2013) :

$$PlayerLoad^{TM} = \sqrt{(a_{x_i} - a_{x_{i-1}})^2 + (a_{y_i} - a_{y_{i-1}})^2 + (a_{z_i} - a_{z_{i-1}})^2}$$

Les termes a_x, a_y, a_z correspondent aux mesures de l'accélération selon les différents axes de l'espace, tandis que les indices i et $i - 1$ correspondent aux instants de mesures évoluant au cours du temps.

Cette variable reste aujourd'hui la mesure de la CEE la plus fréquemment utilisée, et donc, la plus présente dans les études portant sur ce sujet dans le sport en général et dans le Handball en particulier (Bredt, et al. 2020, Kniubaite, et al. 2019, Wik, et al. 2017). Toutefois, compte tenu de la façon dont les accéléromètres sont portés, le cadre de référence dans lequel la CE du joueur est calculée est par définition non inertiel puisque soumis à des changements de translation et de rotation. Alors que les changements de translation du cadre de référence sont intrinsèquement mesurés par le dispositif portable lui-même, ceux de rotation peuvent conduire à un calcul erroné de la CE du joueur si les transformations galiléennes ne sont pas prises en compte en raison de la génération d'accélération fictives par les changements d'orientation du dispositif. C'est pourquoi des chercheurs ont proposé une variable alternative pour contourner ce problème théorique à travers une nouvelle variable dénommée *Accel'Rate*TM (Hollville, et al. 2021). Cette dernière variable se définit comme suit :

$$Accel'Rate^{TM} = \left| \sqrt{(a_{x_i})^2 + (a_{y_i})^2 + (a_{z_i})^2} - \sqrt{(a_{x_{i-1}})^2 + (a_{y_{i-1}})^2 + (a_{z_{i-1}})^2} \right|$$

Les termes a_x, a_y, a_z correspondent aux mesures de l'accélération selon les différents axes de l'espace, tandis que les indices i et $i - 1$ correspondent aux instants de mesures évoluant au cours du temps.

Les auteurs ont testé la validité de cette variable lors de mouvements locomoteurs généraux consistant en des tâches locomotrices de va-et-vient vers l'avant, le côté et l'arrière ; un départ en course consistant en 4 à 5 pas initiaux d'une course (départ debout) ; une course à vitesse constante ; et un duel simulé (1 contre 1), qui consistait en une accélération suivie d'un double appui et d'une manœuvre d'évitement latéral. Ils ont ainsi montré que l'*Accel'Rate* est efficace pour mesurer la CE car contrairement à chaque composante d'un vecteur d'accélération, le module ne dépend pas du cadre de référence. De ce fait, les transformations galiléennes ne sont pas nécessaires lors de la prise en compte des changements de rotation du dispositif, ce qui évite l'accumulation potentielle d'accélération fictives lors de l'estimation de la charge mécanique du corps entier sur le terrain. Bien que n'ayant pas fait l'objet d'autant d'études que le *PlayerLoad*TM, l'*Accel'Rate*TM (AR) sera privilégié dans le cadre de ce travail de thèse car il semble plus pertinent pour la mesure de la CEE, notamment en Handball puisque les joueurs, notamment les pivots, sont confrontés à un grand nombre de mouvement en rotation qui sont,

comme nous l'avons vu, à l'origine des erreurs de mesure du *PlayerLoad*TM. L'utilisation de ces variables présente également l'avantage d'être sensibles aux perturbations biomécaniques (i.e. modification musculosquelettiques, temporaire ou permanente, impactant les déplacements) (Barrett, et al. 2014, Buchheit, et al. 2015) ainsi qu'aux fluctuations dans les types de motricités employées, souvent significatives d'une fatigue aiguë (Barrett, et al. 2016a, Barrett, et al. 2016b, Portas, et al. 2010) ou chronique (Cormack, et al. 2014, Gallo, et al. 2016). De plus, il est important de s'attarder sur les données issues des accéléromètres car elles présentent l'avantage d'être sensibles aux perturbations issues de mouvements spécifiques du haut du corps (Barrett, et al. 2014). Ainsi il est courant, dans les sports collectifs, d'analyser la CEE à partir de l'évolution des données accélérométriques (cf. Figure 23).

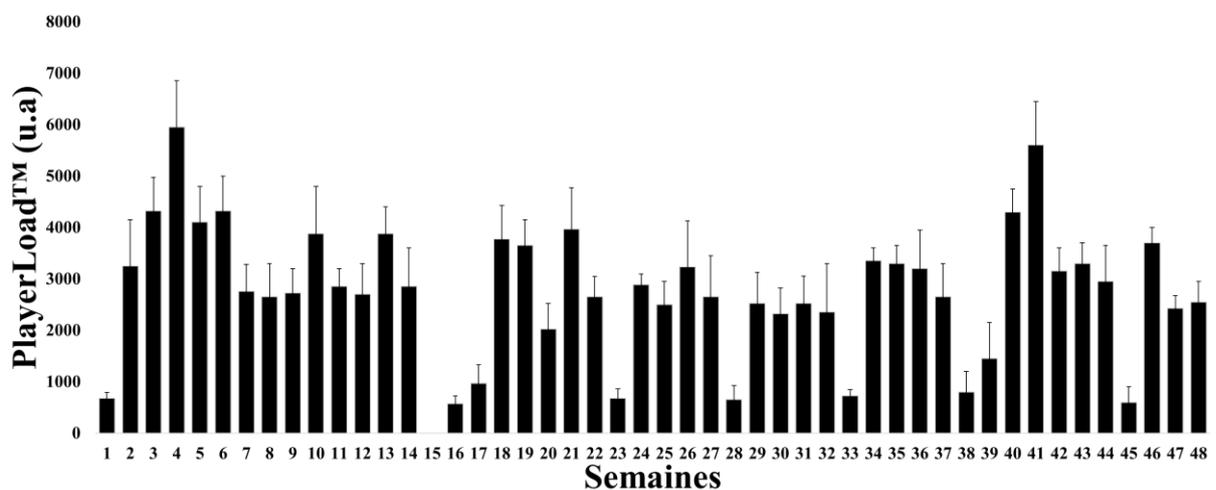


Figure 23 : Exemple de suivi de la CEE à l'aide du *PlayerLoad*TM d'après Robineau et al. (2020).

Au-delà de la mesure de la CEE à l'aide de ces mesures accélérométriques, la capacité de ces dernières à être sensible aux mouvements du haut du corps, en dehors des déplacements est particulièrement utile. En effet, dans le cadre du Handball l'activité des pivots dont l'activité est restreinte en termes de déplacements, du fait de leur positionnement dans la défense adverse, mais dont le rôle est pourtant déterminant, ne peut être pleinement comprise par le biais des analyses de déplacements. De plus, le grand nombre de rotation effectué à ce poste peut sembler surprenant au vu de leur activité mesurée par les autres variables, mais l'analyse de ces mesures accélérométriques permettra potentiellement de mieux comprendre la spécificité de ce poste en apportant des données nouvelles sur l'activité des joueurs au poste de pivot, en comparaison des autres postes.

4.3 Bilan

Durant cette partie nous avons donc pu voir que la charge d'entraînement en sport collectif se définit à travers deux paramètres, à savoir la CEi et la CEe. Le premier correspond à l'impact physiologique et biomécanique de l'entraînement sur le sportif et peut être mesuré au travers de différents paramètres subjectifs ou objectifs. Dans l'activité Handball peu d'étude se sont attelées à l'analyse de ces paramètres et à leur évolution. Les quelques études ayant portées sur le sujet ont tout de même permis d'établir un état des lieux de l'impact physiologique de la pratique du Handball, notamment en démontrant la haute fréquence cardiaque des joueurs sur l'ensemble de leur temps de jeu (> 170 Bpm en moyenne). Les études portant sur l'analyse de la $\dot{V}O_2$ ont pu mettre en évidence des capacités aérobique similaire chez les Handballeurs et les athlètes spécialiste d'endurance, avec toutefois des capacités inférieures proportionnellement à la masse des joueurs. De même, les études ayant porté sur la lactatémie post exercice ont montré une élévation de la concentration en lactate similaire à celle pouvant avoir lieu en Football. Ces analyses de la CEi montrent l'impact physiologique élevé de la pratique de l'activité Handball, sans pour autant renseigner sur la spécificité des différents postes. Une autre manière de mesurer la CEi consiste à s'appuyer sur le ressenti des sportifs. Pour cela l'idée est de demander aux joueurs leur ressenti sur les différentes séances d'entraînements et de suivre l'évolution de ces données. D'ailleurs, l'unique étude menée dans le Handball pour comprendre l'évolution de la CEi en fonction du rythme des matchs au cours d'une saison, s'appuie sur ces données subjectives. Toutefois, bien que cette étude arrive à des conclusions similaires à celle ayant pu être observé dans d'autres sport, l'absence de données objectives pour corroborer ces résultats ne permet pas de conclure indubitablement à une modification de la CEi au cours des semaines présentant un enchainement de matchs. Des études, plus nombreuses se sont intéressé à l'analyse de la CEe en Handball mais aucune n'a porté sur l'évolution de celle-ci en fonction du rythme des matchs. Cependant, ces études menées à l'aide des analyses de mouvement au cours du temps ont pu montrer les particularités des différents postes (cf. 3. ANALYSE DE L'ACTIVITÉ DES JOUEURS LORS DES COMPÉTITIONS ÉLITES). Néanmoins, aucune étude n'a, pour le moment, analysé l'évolution de cette CEe sur la durée. De nombreuses études ont été menée dans le but de déterminé la meilleure manière de calculée la CEe à partir des mesures accélérométriques. La dernière méthode proposée à ce jour semble être la plus pertinente en ce qu'elle supprime les erreurs de mesure associées aux rotations du référentiel de

mesure dans l'espace. Toutefois, puisque cette méthode de calcul est récente, aucune étude n'a pour le moment été effectuée à l'aide de cette variable. Toutefois, aucune étude n'a porté sur la caractérisation de la CEE à partir des mesures accélérométriques en compétition en Handball ni sur son évolution en fonction du rythme des matchs.

5 PÉRIODISATION DE LA CHARGE D'ENTRAÎNEMENT EN SPORT COLLECTIF

5.1 Organisation de l'entraînement en Handball

Après avoir présenté les différentes méthodes permettant d'effectuer le suivi de la CE des joueurs, il est important de s'intéresser à la façon dont sont organisés les entraînements en Handball afin de mieux comprendre comment, à partir du suivi de l'activité des joueurs, il est possible de réguler cette CE. Contrairement aux sports collectifs d'extérieurs (Football et Rugby), il existe peu de recherches comparant l'intensité de l'entraînement à l'intensité des matchs officiels de Handball (Buchheit 2014, Luteberget, et al. 2018c). Or, connaître l'intensité des exercices basés sur le jeu par rapport aux exigences de match permet d'améliorer leur programmation au sein du microcycle hebdomadaire, laissant par conséquent à l'entraîneur le choix des exercices les plus appropriés pour surcharger ou décharger les joueurs selon leur temps de jeu effectif (Delgado-Bordonau and Mendez-Villanueva 2014). Dans la seule étude à ce jour sur le Handball féminin (Luteberget, et al. 2018c), les situations de jeu en 3v3 et 6v6 représentaient une surcharge par rapport à la demande en termes de CEE mesurée à l'aide du *PlayerLoad*TM. Cependant, cette mesure de CE n'est qu'un indicateur général de la charge externe et manque de spécificité lorsqu'il s'agit de comprendre les exigences locomotrices réelles (i.e., accélérations, décélérations, sauts, courses à haute intensité, etc.). D'une manière générale, deux types d'entraînements peuvent être menés. D'une part les entraînements visant à l'amélioration des capacités physiques et d'autre part ceux ayant pour but le développement des compétences technico-tactiques. Dans le cadre de l'entraînement recherchant l'amélioration des capacités physiques, l'objectif est d'induire un stress physiologique sur le corps dans le but de le faire réagir. En effet, l'équilibre interne du corps humain, connu sous le nom d'homéostasie (Cannon 1939), assure son bon fonctionnement général mais l'exercice physique, qui est perçu comme une source de stress par le corps, vient perturber cet équilibre. Afin d'adapter le corps humain aux changements induits par ce stress, qui éloignent le corps de l'homéostasie, de nombreux mécanismes physiologiques se mettent en place pour ramener le corps à son état d'équilibre. L'ensemble de ces réactions, décrites sous l'appellation de syndrome d'adaptation générale (Selye 1950) organise la réponse physiologique au stress en trois phases (Carlson, et al. 1997). Selon l'intensité du stress et le niveau de résistance personnel

de l'individu, ce stress physiologique sera perçu plus ou moins fortement par le corps. Ceci signifie donc qu'une même intensité d'entraînement, donc un niveau de stress induit équivalent, ne sera pas perçu de la même manière par les athlètes selon leurs habitudes d'entraînements. À la suite d'une phase de réaction d'alarme, induisant une diminution des capacités du corps humain, ce dernier entre en résistance avec un double objectif. Le premier est bien entendu de rétablir l'homéostasie du corps, mais le but de cette phase est aussi de permettre l'élévation du seuil de tolérance au stress (Selye 1956). Ainsi, si l'on conserve l'idée de l'exercice physique, l'organisme des athlètes va commencer à s'adapter au stress mais il va surtout chercher à augmenter ses capacités physiologiques au-dessus du niveau d'origine afin d'être en mesure de faire face à ce même stress à l'avenir. Ce processus, appelé "surcompensation", est à la base de l'entraînement suivi par tous les sportifs et qui vise à augmenter les qualités physiques des athlètes dans le but d'améliorer leurs performances. Si, pour s'adapter au stress subi, le corps humain ne pouvait utiliser que ces deux phases, les principes d'entraînement des sportifs serait extrêmement simple, il suffirait d'augmenter le stress induit par les entraînements pour améliorer les performances. Toutefois, si le stress subi dépasse les capacités d'adaptation de l'individu, ou bien, si avant que l'individu ne se soit remis d'un stress initial, un nouveau stress lui est imposé, une troisième phase dite d'épuisement apparaît (Selye 1965). Cette dernière phase correspond à une mal- ou désadaptation puisque le corps n'est plus capable de s'adapter au stress auquel il est soumis (cf. Figure 24). Elle se caractérise par une diminution du seuil de résistance au stress, passant même en dessous du niveau de base, ce qui a pour effet de fragiliser le corps et donc d'augmenter les risques de fatigue avancée, de baisse de performance, de blessure, d'infection/maladie ou encore de troubles psychologiques (Halson 2014, Hausswirth, et al. 2014, Meeusen, et al. 2013). Ce surmenage a par la suite été détaillé en quatre niveaux caractéristiques de pratique sportive plus ou moins intensives et/ou prolongées par Meeusen et al. (2013). Parmi ceux-ci, les deux premiers ne sont pas à proprement parlé des phases de désadaptation car la baisse des performances n'est que temporaire et le délai de récupération varie de quelques jours à quelques semaines. Le 1^{er} niveau correspond à une fatigue aigüe et transitoire, le 2nd niveau représente un état de surmenage fonctionnel qui est le plus souvent programmé et qui apparaît souvent après une période intensive de préparation (camp d'entraînement, période de préparation physique). Ce 2nd niveau se caractérise par une diminution ponctuelle des performances, induite par une accumulation de fatigue, qui doit permettre une amélioration notable des qualités physiques entraînées lorsqu'une période de

repos ou d'affutage est programmée (Coutts, et al. 2007a). Les deux derniers niveaux correspondent aux états de surmenage non-fonctionnels et de surentraînement. Ils se caractérisent par une baisse substantielle et prolongée des performances physiques associée à des perturbations chroniques de l'homéostasie. Cela se traduit par des perturbations potentielles du système endocrinien (Meeusen, et al. 2004), du système nerveux autonome (Halson and Jeukendrup 2004, Le Meur, et al. 2013a, Le Meur, et al. 2013b) ou encore des systèmes immunitaires et autres composants biologiques (Coutts, et al. 2007a, Coutts, et al. 2007b, Elloumi, et al. 2005, Hausswirth, et al. 2014, Hooper and Mackinnon 1995, Smith 2000). Il est important de noter que, dans le cadre de la pratique des sports collectifs, le concept de surmenage non fonctionnel est privilégié à celui de surentraînement. Cela se concrétise par l'apparition de blessure et/ou par une baisse du niveau de performance.

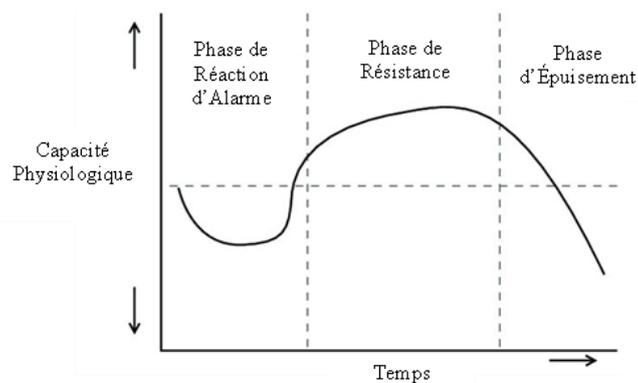


Figure 24 : Syndrome Général d'Adaptation d'après Selye (1956).

En conséquence l'entraînement physique des sportifs consiste à trouver le juste équilibre entre l'intensité du stress induit par cet entraînement et le temps de récupération laissé aux athlètes pour permettre à la phase de résistance de produire ces effets. Dans le cadre des entraînements à visée technico-tactique, l'objectif est de permettre aux athlètes d'améliorer leurs compétences spécifiques liées à l'activité pratiquée. De plus, dans le cadre des sports collectifs, l'objectif est d'élever les compétences individuelles et collectives afin de donner la possibilité à chacun des joueurs de reconnaître les différentes situations de jeu, et de les affronter individuellement et collectivement. Cet aspect de l'entraînement est donc essentiel, d'autant plus que l'équipe ayant le plus grand sens tactique présente une capacité à résoudre plus efficacement et plus rapidement les problèmes de jeu posés par les adversaires, et ce de manière individuelle ou collective (Clemente, et al. 2021a, Folgado, et al. 2015). Aujourd'hui, les connaissances acquises sur l'entraînement permettent d'en adapter sa conception afin d'en obtenir les effets souhaités au moment voulu. Pour cela, l'entraînement doit être séquencé, progressif et organisé

autour de périodes d'entraînement, c'est ce que l'on appelle la périodisation de l'entraînement (Issurin 2010, Los Arcos, et al. 2017, Loturco, et al. 2016, Marrier, et al. 2018, Matveyev 1964, Robineau, et al. 2020). Cependant, dans le cadre des sports collectifs comme le Handball, la saison sportive ne s'organise pas autour d'évènements ponctuels durant l'année mais en un chevauchement de plusieurs compétitions nationales et continentales en club se prolongeant tout au long de l'année, entrecoupées de périodes de compétitions internationales. Dans ce contexte, les joueurs internationaux peuvent jouer jusqu'à 90 matchs par an. L'enjeu est, en conséquence, de gérer la structuration des entraînements afin de permettre aux joueurs de maintenir leur niveau de performance tout au long de l'année. Dans ces conditions, il est nécessaire de quantifier, avec le plus de précision possible, le travail physique effectué par les joueurs, à la fois en entraînement et en match, dans l'objectif de vérifier le niveau de performance des joueurs (Borresen and Lambert 2009).

5.2 Les jeux réduits

Ces dernières années, les concepts et méthodologies d'entraînement, dans de nombreux sports d'équipe, ont été questionnés et ont évolué notamment autour de la question de l'intégration de l'aspect physique de l'entraînement dans les séquences de travail technico-tactique. Ainsi de nombreuses études se sont intéressées aux conditions permettant aux exercices effectués avec ballon d'être des substituts acceptables aux méthodes d'entraînements dites traditionnelles, sans ballon, pour le développement des qualités physiques des joueurs (Hill-Haas, et al. 2011, Impellizzeri, et al. 2006, Little and Williams 2006, Sassi, et al. 2005). Les études portant sur l'utilisation des « jeux réduits » (Small Sided Games, SSGs), démontrent que ces situations d'entraînement reproduisent des situations de jeu spécifiques où les capacités physiologiques et technico-tactiques peuvent être développées simultanément et sont au moins aussi efficaces que les méthodes dites classiques (i.e. méthodes utilisant des situations spécifiques de travail physique) pour stimuler les athlètes et les amener à performer (Buchheit, et al. 2009b, Foster, et al. 2010, Gamble 2004, Hill-Haas, et al. 2011, Impellizzeri, et al. 2006, Lacombe, et al. 2018b, Martin-Garcia, et al. 2019, Sassi, et al. 2005, Tee, et al. 2018). Il a d'ailleurs été clairement, établi dans le Football et le Rugby, que les SSGs sont des exercices d'entraînement pertinents pour développer, au moins partiellement, les capacités physiques spécifiques en ce qu'ils peuvent présenter des intensités de jeu supérieures à celles vécues durant les matchs (Impellizzeri, et al. 2006, Lacombe, et al. 2018b, Tee, et al. 2018). Impellizzeri et al. (2006) ont

pu définir que l'utilisation de SSGs dans le but d'améliorer les capacités aérobies des athlètes était aussi efficace que l'utilisation de sessions spécifiques. Ils ont ainsi pu montrer des améliorations de 7 %, 10 % et 2 % du la $\dot{V}O_2max$, du seuil de lactate et de l'économie de course au seuil de lactate, respectivement, après 14 semaines d'entraînement. De même les auteurs ont pu mettre en évidence que l'intensité moyenne de l'exercice, exprimée en % de la fréquence cardiaque maximale (FC_{max}), lors des séances de course par intervalles n'était pas différente de celle atteinte durant les séances de jeux à effectif réduit. Ainsi les SSGs représentaient une intensité de $91,3 \pm 2,2$ % de la FC_{max} tandis que les courses spécifiques représentaient $90,7 \pm 1,2$ % de la FC_{max} . De plus, la capacité des SSGs à reproduire, voire à dépasser les intensités des matchs a été mise en évidence par plusieurs études menées respectivement dans le Rugby et le Football. Les auteurs ont montré que la réduction de la densité des joueurs pendant les SSG a entraîné une augmentation du nombre total de manœuvres d'agilité pour les athlètes d'élite de l'Australian Football League (AFL) (Davies, et al. 2013) tandis que l'augmentation de la surface de terrain des SSGs associée à la diminution du nombre de joueurs augmentent la FC des joueurs, la RPE et les concentrations de lactate dans le sang (Rampinini, et al. 2007, Sampaio, et al. 2007). De même l'augmentation du nombre de joueurs (et concomitamment de la taille du terrain) augmente les distances totales et à haute vitesse pendant les SSGs (Lacome, et al. 2018b). En effet, une augmentation de la surface de jeu relative (de ~ 90 (4 vs 4) à ~ 310 m²/joueur (10 vs 10)) permet de couvrir plus d'espace (Buchheit and Laursen 2013) et d'atteindre des vitesses plus élevées. Lacome et al. (2018.b) ont par ailleurs mis en évidence, en Football, que la différence d'intensité locomotrice entre des SSGs de grande envergure (10 vs 10) et les matchs est tout à fait minime passant de 180 m·min⁻¹ pendant 1 minute à 121 m·min⁻¹ pendant 15 minutes pour les matchs, à 182 m·min⁻¹ et 117 m·min⁻¹ respectivement pour les SSGs. Lors de cette étude, les auteurs ont aussi pu remarquer que les SSGs sont en mesure de dépasser les intensités de matchs en termes de CE en particulier sur des périodes courtes d'activité. Ainsi des SSGs à 4 vs 4 (< 5 min) et à 6 vs 6 (2-15 min) sont efficaces dans le but de dépasser les intensités de matchs. Cette possibilité de travailler à des intensités de jeu supérieures à celles des matchs, donc d'avoir un impact physiologique supérieur sur les joueurs, provient de la capacité de ceux-ci à présenter un grand nombre d'interactions entre eux ainsi que des exigences physiques intenses dès lors que les formats de jeu utilisés sont appropriés (i.e., le nombre de joueurs, la superficie, les règles) (Clemente, et al. 2014, Kennett, et al. 2012, Klusemann, et al. 2012). Par conséquent, les SSGs sont

aujourd'hui les types d'exercices les plus couramment utilisés par les entraîneurs dans de nombreux sports d'équipe. Pour autant, dans le cadre du Handball, bien que ce type d'exercice soit fréquemment utilisé (Buchheit, et al. 2009b), il persiste un manque de connaissances scientifiques sur la manière de mettre en place ces SSGs, que ce soit en termes de nombre de joueurs impliqués, de dimensions du terrain ou de durée (Belka, et al. 2017, Buchheit, et al. 2009a, Buchheit, et al. 2009b, Corvino, et al. 2014, Dello Iacono, et al. 2016, Dello Iacono, et al. 2017, Dello Iacono, et al. 2018, Dello Iacono, et al. 2021). En effet, les études menées en Handball restent cantonnées à des formats de jeu peu employés au niveau élite ce qui limite leur prise en compte par les entraîneurs des équipes professionnelles. Néanmoins elles permettent de mettre en lumière que les paramètres des SSGs peuvent être manipulés pour moduler l'activité des joueurs. Ainsi, Buchheit et al. (2009.a & b) ont conduit deux études portant sur la capacité de ces SSGs à développer les capacités physiques des joueurs, en comparaison avec des entraînements par intervalles à haute intensité (High Intensity Interval Training, HIIT). Ces études concluent que les entraînements de Handball basés sur les HIIT ou les SSGs sont aussi efficaces, mais ils s'accordent à dire que les SSGs devraient être privilégiés en raison de leurs apports technico-tactiques simultanés (Buchheit, et al. 2009a, Buchheit, et al. 2009b). Bien que ces études n'aient porté que sur un type de SSGs (4 vs 4 tout terrain), les résultats ont été confirmés par Iacono et al. en 2016 à l'aide de SSGs organisées en 3 vs 3 sur demi-terrain (20 × 20 m) ce qui permet de dire que l'utilisation de ces SSGs est efficace pour développer les capacités physiques des quel que soit leur organisation (Dello Iacono, et al. 2016). D'ailleurs Bělka et al. (2017) ont montré que le fait de modifier le nombre de joueurs dans des SSGs permet de réguler l'activité des joueurs de Handball en condition d'entraînement et que plus ce nombre de joueurs est faible, plus les SSGs reproduisent les intensités de la compétition. De nombreuses études, dans d'autres sport que le Handball, ont présenté l'apport des SSGs en termes de volume et d'intensité de jeu par rapport aux références des matchs de compétition. Néanmoins, nous n'avons répertorié qu'une seule étude portant sur l'évaluation du volume de jeu engendrée par les SSGs en Handball, et celle-ci ne porte que sur des joueurs amateurs ce qui limite la pertinence concernant la généralisation des conclusions de cette étude aux joueurs professionnels (Corvino, et al. 2014). L'étude menée par Corvino et al. (2014), sur 6 joueurs amateurs, a analysé les distances totales parcourues et les intensités des déplacements dans différentes configurations de SSGs. Les formats de jeux étudiés étaient de 24 m de long par 12 m de large, 30 × 15 m et enfin 32 × 16 m, tous pratiqués en opposition 3 contre 3. Les

auteurs ont différencié les distances totales parcourues par les joueurs selon quatre plages de vitesses ($< 1,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $1,4 - 3,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $3,4 - 5,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $> 5,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Leurs résultats montrent que les distances totales parcourues varient en fonction de la surface de jeu, et surtout augmentent avec l'agrandissement de l'espace de jeu. Ainsi, la DTp moyenne était de $885,2 \pm 66,6 \text{ m}$ pour l'aire de jeu de $24 \times 12 \text{ m}$, de $980 \pm 73,4 \text{ m}$ pour celle de $30 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ et de $1095 \pm 112,9 \text{ m}$ pour celle de $32 \text{ m} \times 16 \text{ m}$. De plus, l'analyse des vitesses de déplacement a montré que les plus grandes distances totales parcourues le sont dans les gammes de vitesses situées entre $1,4$ et $5,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Enfin, cette étude a montré que les distances parcourues par minute sont aussi plus importantes avec l'augmentation de la surface de jeu. En effet, les joueurs parcourent $110,7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ sur la surface de $24 \times 12 \text{ m}$, $122,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ sur celle de $30 \times 15 \text{ m}$ et $136,9 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ sur la surface de $32 \times 16 \text{ m}$. Bien que les superficies de jeu soient différentes de celles classiques de matchs, les résultats sont bien supérieurs à ce qu'il a pu être mesuré en match, sur une surface de jeu de $40 \times 20 \text{ m}$, en 7 contre 7 (Bon 2001, Cardinale, et al. 2017, Luig P. 2008, Machado, et al. 2021, Michalsik and Aagaard 2015, Michalsik, et al. 2013, Pori 2003, Póvoas 2009, Šibila 2004). Sur la base de ces études concernant l'utilisation et le paramétrage des SSGs en Handball, il semble difficile aujourd'hui pour les entraîneurs des équipes élites de les calibrer de façon pertinente. En effet, l'ensemble des études citées précédemment ont travaillé sur des situations de 3 contre 3 ou 4 contre 4 tout terrain, ou presque, ce qui correspond à des situations peu exploitées par les entraîneurs du haut niveau. Ces derniers ont, en effet, tendance à privilégier des situations plus proches des conditions réelles de match, avec une densité de joueurs plus forte. De plus, les fluctuations d'intensité inhérentes à l'activité n'ayant pas non plus été analysées dans le Handball, les entraîneurs sont limités à prescrire objectivement et à contrôler les SSGs par rapport aux intensités moyennes de match, ce qui peut entraîner une sous-préparation de leurs athlètes aux intensités maximales auxquelles ils seront exposés pendant les matchs.

5.2 L'enchaînement des matchs

Dans le cadre des sports collectifs tel que le Handball, le rythme des matchs peut être extrêmement chargé avec, comme nous l'avons déjà dit plus haut, plus de 80 matchs joués sur une saison durant 9 mois. Ce rythme des matchs a un impact évident sur l'organisation des entraînements et les stratégies de gestion de la CE mise en place. Toutefois, nous n'avons recensé qu'une seule étude ayant porté sur l'analyse de la gestion de la CE en Handball

(Clemente, et al. 2021b). Cette étude a révélé que les semaines avec deux ou trois matchs (respectivement 9694 ± 3080 m et 9809 ± 2261 m) présentaient une distance à charge métabolique élevée 42 à 44 % plus importante que durant les semaines avec un unique match (6817 ± 2677 m). Cette distance à charge métabolique élevée est définie comme la distance parcourue à une vitesse supérieure à $5,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et en accélérant ou décélérant à une magnitude de $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ou plus. Il semble donc nécessaire de mieux comprendre les stratégies de gestion de la CE mises en place dans ces différents contextes. D'ailleurs, des études ont été menées dans ce sens dans le Rugby et le Football et ont clairement décrit l'impact de l'enchaînement des matchs sur l'activité des joueurs. Ceci a fourni de précieuses informations relatives aux stratégies mises en place par les membres des équipes encadrantes et les joueurs pour faire face à de telles exigences. (Carling and Dupont 2011, Clemente, et al. 2021b, Dellal, et al. 2015, Djaoui, et al. 2014, Dupont, et al. 2010, Folgado, et al. 2015, Freitas, et al. 2021, Gualtieri, et al. 2020, Marqués-Jiménez, et al. 2017, Moreira, et al. 2016, Twist, et al. 2017). Ainsi, il a été mis en évidence une détérioration des performances physiques avec l'enchaînement des matchs (Freitas, et al. 2021, Moreira, et al. 2016, Twist, et al. 2017). Les auteurs ont pu clairement identifier une diminution progressive des capacités de course et d'explosivité des joueurs avec une dégradation des performances en sprints et en saut. En effet, en comparant les performances de jeunes joueurs de Football avant et après la participation à 14 matchs sur une période de 8 semaines, Freitas et al. (2021) ont mis en évidence une dégradation significative des capacités physique des joueurs (cf. Figure 25).

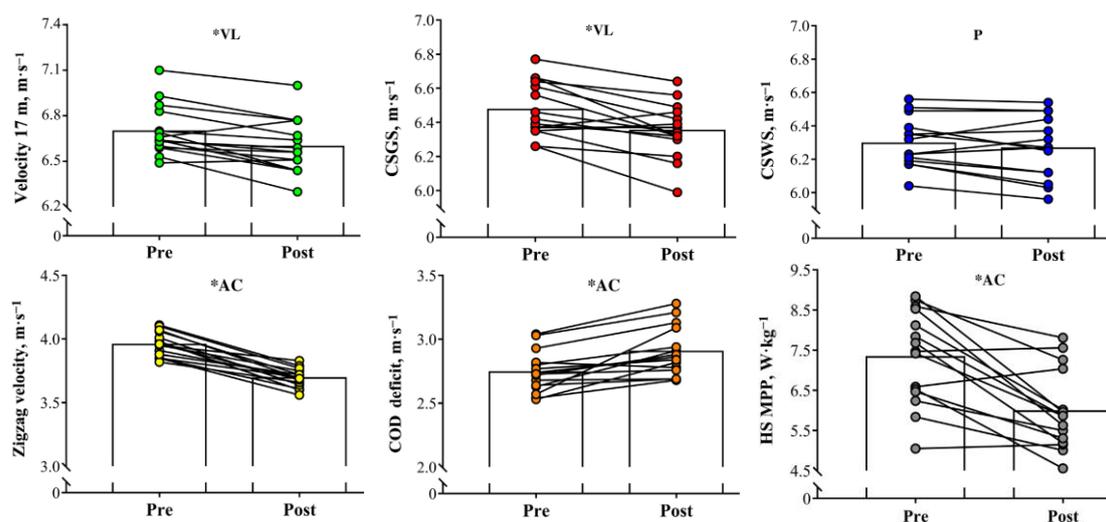


Figure 25 : Résultats des tests pré- et post- période de matchs enchaînés ; vitesse en sprint sur 17 m (Vert), sprint en courbe pour le « bon » côté (CSGS, Rouge), sprint en courbe pour le « mauvais » côté (CSWS, Bleu), vitesse en course en zigzag (Jaune), déficit de changement de direction (Orange), et puissance propulsive moyenne en demi-squat (HS MPP, Gris) ; d'après Freitas et al. (2021).

De même, Twist et al. (2017) ont pu mettre en évidence une diminution progressive de la fonction neuromusculaire au cours de la période de compétition intensifiée en Rugby, et ce malgré la réduction des charges d'entraînement et l'inclusion de stratégies de récupération. Cela implique des changements dans les performances de course, où une augmentation de la distance de course est obtenue grâce à des temps de jeu plus longs et à davantage d'activités de faible intensité. De plus, en étudiant l'impact de l'enchaînement de 2 matchs de Rugby en 4 jours, les auteurs démontrent que 2 jours de récupération est insuffisant pour les joueurs professionnels de Rugby. En effet, leurs fonctions neuromusculaires, mesurée à l'aide des performances de temps de vol en contre-mouvement-saut (countermovement jump), ne sont pas rétablies, ce qui entraîne une activité de faible intensité plus importante lors du second match. En outre, en étudiant l'évolution du nombre d'actions tentées et réussies au cours de 7 matchs de Football joués sur une période de 7 jours (4 matchs en deux jours puis trois jours de récupération, et enfin trois matchs en deux jours), Moreira et al. (2016) ont mis en évidence une diminution de la capacité des joueurs à réussir certaines actions, particulièrement en situation défensive, tandis que les actions offensives ne sont que peu ou pas impactées avec l'enchaînement des matchs (cf. Figure 26). Les auteurs ont également pu montrer un impact négatif sur le système immuno-endocrinien salivaire, notamment sur les réponses en testostérone et en SIgA de l'enchaînement des matchs (cf. Figure 27). Cette étude suggère donc que la fatigue accumulée induite provoque une diminution de la concentration de testostérone chez les jeunes joueurs de football et a eu un effet négatif sur leur immunité muqueuse.

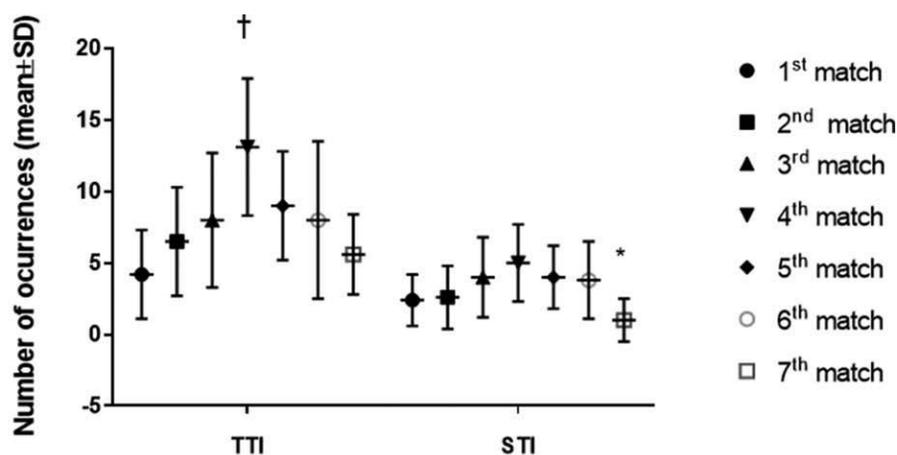


Figure 26 : Tacles et interceptions sur les 7 matchs analysés (Moyenne \pm SD) ; † différence significative par rapport aux 1er et 7e matches ($p > 0,05$) ; * différence significative par rapport aux 4e et 5e matches ($p > 0,05$) ; TTI = Total des Tacles/interceptions ; STI = Tacles/interceptions réussies ; d'après Moreira et al. (2016).

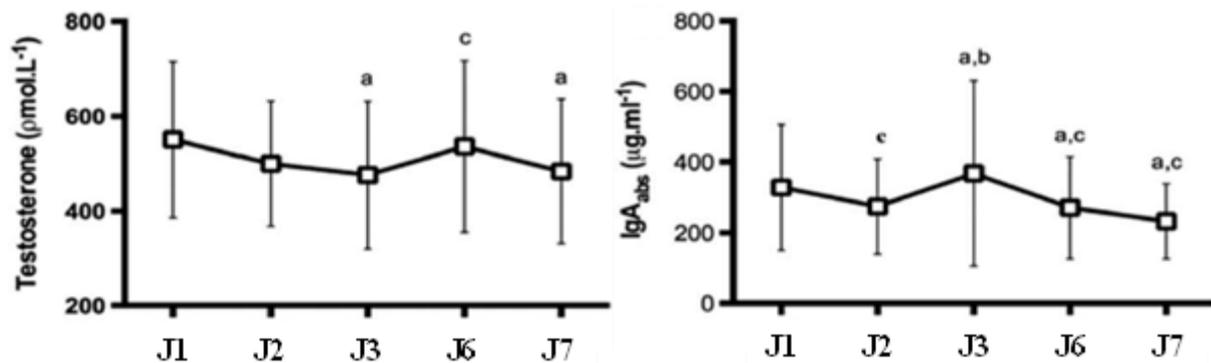


Figure 27 : Mesures salivaires au repos, à jeun (moyenne \pm SD), a = différent de J1, b = différent de J2, c = différent de J3, d'après Moreira et al. (2016).

Par ailleurs, des études ont montré une élévation du risque de blessure avec l'enchaînement des matchs (Dellal, et al. 2015, Dupont, et al. 2010). En effet, le taux de blessures en match était significativement plus élevé lorsque le calendrier des matchs était densifié ($43,3 \pm 14,2$) que lorsqu'il était dégagé ($18,6 \pm 2,3$). Enfin, lorsque les matchs s'enchaînent, cela semble affecter les performances tactiques de l'équipe en limitant le temps disponible à la mise en place d'automatismes entre les joueurs (Folgado, et al. 2015). En effet, cette étude atypique a présenté des preuves que la performance tactique, mesurée par la synchronisation dyadique des mouvements des joueurs dans les axes de déplacement longitudinal (but à but) et latéral (côté à côté), a diminué pendant les matchs lorsque ceux-ci s'enchaînent. La synchronisation dyadique mesurée par les auteurs consiste à mesurer la capacité de deux joueurs évoluant à des postes différents mais proche l'un de l'autre à effectuer des mouvements de manière synchrone. Ainsi l'ensemble des combinaisons ont pu être testé, à savoir ailier – arrière latéral, arrière latéral – demi-centre, ainsi qu'ailier – pivot, arrière latéral – pivot et enfin pivot – demi-centre. Les auteurs ont particulièrement remarqué que ces différences de synchronisation étaient plus prononcées lors de mouvements de faible intensité. Cela suggère qu'en situations peu risquées, les joueurs sont moins attentionnés à l'activité de leurs partenaires et désynchronisent leurs mouvements préalablement synchronisés lorsque le calendrier des matchs est trop chargé. Au regard des risques engendrés par l'accumulation des matchs sur des périodes courtes, des stratégies d'entraînement et de récupération optimisées et bien programmées sont nécessaires pour réduire, voire éviter, les éventuelles baisses de performance physique (Freitas, et al. 2021) et pour maintenir un faible taux de blessures (Dupont, et al. 2010). C'est pourquoi, les auteurs préconisent au personnel technique des équipes sportives d'élite de surveiller la vitesse et les qualités liées à la puissance des joueurs. Des mesures efficaces et pratiques (par exemple, des sprints courts ou des tests de saut vertical) peuvent ainsi

permettre de réévaluer et d'adapter les stratégies d'entraînement mises en place (Twist, et al. 2017). Il apparait aussi que la capacité, de la part de l'encadrement des équipes élites, à gérer la rotation des joueurs lors des matchs est cruciale afin de préserver les capacités neuromusculaires des joueurs durant les périodes d'enchaînement des matchs (Dupont, et al. 2010, Twist, et al. 2017). De plus, afin de limiter l'impact de ces périodes d'enchaînement des matchs sur les capacités de synchronisation des joueurs, il est possible d'envisager des séances d'entraînement spécifiques de positionnement et de coordination de groupe, complémentaires ou liées à la récupération physique, pendant ces périodes (Folgado, et al. 2015).

5.3 Bilan

Cette dernière partie de notre revue de littérature nous a permis de mettre en évidence que la principale problématique dans la gestion des entraînements en Handball se situe au niveau du rythme des matchs. En effet, les équipes du niveau élite étant engagé dans l'ensemble des compétitions nationales ainsi que dans les compétitions internationales se retrouvent généralement à jouer deux matchs par semaines en moyenne de septembre à juin, hormis durant les trêves internationales. Par ailleurs, au sein de ces équipes les plus performantes en Europe et au niveau national, de nombreux joueurs sont internationaux. De ce fait ils participent aux rassemblements en équipe nationale qui viennent s'ajouter au calendrier très chargé, les amenant à jouer près de 90 matchs dans la saison. Il est donc impératif pour les entraîneurs et les préparateurs physiques d'organiser les entraînements afin d'allier récupération et préparation des rencontres à venir. Comme nous l'avons vu, il est primordial d'organiser la récupération des joueurs afin d'éviter l'apparition d'un surmenage non fonctionnel provoquant une diminution des performances à longs termes. Par ailleurs, puisqu'il a été démontré au Rugby et au Football que l'enchaînement des matchs provoque une diminution des performances physiques des joueurs, il est intéressant de s'interroger sur la façon dont la gestion de la CE en Handball permet aux joueurs de conserver un niveau de performance élevé tout au long de la saison. En effet, plusieurs études ont montré une diminution des performances physiques lors de tests physiques, de la capacité à réaliser correctement certaines actions, ou encore une diminution de l'immunité muqueuse des joueurs à la suite de prélèvements salivaires. Certes ces deux sports (Football et Rugby) présentent de nombreuses différences avec le Handball, mais il est tout de même aisé de trouver certaines correspondances entre ces sports, à commencer par la gestion d'un effort intermittent avec une accumulation de contacts.

Ainsi, afin de mieux comprendre de quelle manière la CE est gérée en Handball, il est nécessaire de s'interroger sur la manière dont sont conduits les entraînements au niveau élite. Là encore, les données issues des différentes études menées en Handball ne nous renseignent que très partiellement puisqu'elles s'appuient, dans leur intégralité, sur des situations d'entraînements peu ou pas exploitées au haut niveau. En effet, les études dont nous avons connaissance n'ont traité la question des SSGs qu'au travers de formats en 3 contre 3 ou 4 contre 4 tout terrain, ou sur des dimensions de terrain légèrement inférieures mais toujours proportionnelles à celle d'un terrain complet. Ces études ont tout de même mis en évidence la capacité des SSGs à permettre le développement des capacités physiques des joueurs, et la possibilité de faire varier leur impact physiologique par des modifications de règles et/ou de dimensions de terrain. Toutefois, cela n'est pas directement exploitable pour les équipes élités puisque les situations testées ne sont pas adaptées aux besoins de ces publics. Il est donc nécessaire d'analyser les SSGs classiquement utilisés par les entraîneurs du niveau élite pour mieux comprendre en quoi ces situations sont pertinentes pour répondre à leurs besoins et comment il serait possible de les moduler pour atteindre des objectifs différents. Ainsi cette partie nous amène à nous questionner sur l'organisation des entraînements au niveau élite et plus particulièrement sur la façon dont les SSGs employés permettent de reproduire les intensités de matchs et comment il serait possible de les moduler pour répondre à des objectifs spécifiques. De même, nous pouvons nous interroger sur les stratégies de gestion de la CE mise en place au niveau élite permettant de maintenir un haut niveau de performance tout au long de la saison malgré un rythme des matchs soutenu. Éclairer cette information permettrait aux entraîneurs de questionner leur pratique actuelle et comprendre dans quelle mesure elles pourraient être optimisées.

OBJECTIFS EXPERIMENTAUX

Au regard des informations recueillies tout au long de notre revue de littérature, il apparaît plusieurs manques auquel notre travail de recherche tentera de contribuer. Tout d'abord nous avons pu mettre en évidence que la validité des différents systèmes LPS doit être questionnée puisque les études ayant portées sur ce type d'outils ont montré des limites dans la validité des mesures selon les paramètres étudiés et selon la configuration mise en place. Il apparaît donc judicieux de contrôler la validité des mesures du système que nous souhaitons utiliser pour notre travail de recherche avant de nous concentrer sur l'analyse de l'activité Handball à l'aide de cet outil. Par ailleurs, nous avons également pu mettre en évidence des lacunes dans les connaissances scientifiques de l'activité Handball, en particulier concernant l'intensité de l'activité déployée par les joueurs durant les compétitions. Or, nous avons souligné la nécessité, pour les entraîneurs et préparateurs physiques, de caractériser correctement l'activité des joueurs en match et en entraînement, notamment en termes d'intensité. L'utilisation d'un outil tel que le LPS permet justement d'approfondir cette question à travers l'utilisation de nouvelles méthodes issues d'autres sports collectifs. Ces méthodes s'appuyant sur le calcul des intensités maximales au travers de différentes moyennes mobiles permettent d'établir les intensités maximales atteintes par les joueurs durant les compétitions. Pour cela, les systèmes LPS permettent d'obtenir les mesures les plus précises de l'activité des joueurs pour les sports en salle. Ce sont surtout les seules technologies permettant d'avoir une mesure continue au cours du temps ce qui offre la possibilité de mener le type d'analyse requises. Enfin, nous avons pu démontrer la nécessité pour les équipes élites, d'avoir une connaissance approfondie de l'impact du rythme des matchs sur les joueurs afin de mieux organiser la récupération des joueurs et l'associer aux exigences de travail des entraîneurs, inhérentes aux compétitions. Nous avons mis en évidence le rythme annuel intense des matchs de Handball pour les équipes élites, ce qui implique une importance primordiale de ces connaissances. Ainsi, puisque le corpus de connaissance sur le sujet en Handball est vierge à l'exception d'une étude, il nous semble important de proposer une analyse de l'impact du rythme des matchs sur l'organisation des entraînements et les régulations qui peuvent être mise ne place dans le cadre d'une équipe élite. Ainsi notre travail s'organisera autour de trois axes principaux.

Premièrement, notre but sera donc de valider le système LPS, Kinexon™, utilisé dans le cadre de notre travail. Pour cela il nous semble nécessaire de valider les mesures de vitesse et d'accélération en fonction de l'emplacement sur le terrain. En effet, ces outils ont montré de réelles différences de performances selon que les mesures étaient effectuées en condition optimale ou non. De ce fait nous chercherons à valider l'hypothèse selon laquelle, par rapport à un système de référence, le nouveau LPS Kinexon™ présente des mesures valides pour les vitesses, accélérations et décélérations maximales. De plus, puisque nous questionnerons l'impact de la position sur le terrain sur la validité de la mesure, notre hypothèse sera que lorsque les mesures sont effectuées en bord de terrain, donc en configuration non optimale pour le système, la qualité des mesures se dégrade et donc la validité de celle-ci diminue.

Deuxièmement, nous déterminerons les intensités maximales déployées durant les matchs par les joueurs selon leurs postes afin de permettre l'individualisation de la préparation physique des joueurs. En effet, seule la caractérisation des intensités maximales atteintes par les joueurs permettra d'assurer une préparation adéquate des joueurs aux efforts qu'ils sont amenés à fournir durant les compétitions. Par ailleurs, il est nécessaire de connaître l'activité des joueurs en entraînement afin de pouvoir la réguler. Ainsi, l'analyse des intensités maximales durant les entraînements nous permettra de mieux comprendre l'organisation mise en place. Il nous sera alors possible d'améliorer la gestion globale de la CE des Handballeurs élités. C'est pourquoi, nous travaillerons à partir de deux hypothèses. La première sera que la diminution de l'intensité au fil du temps suit une loi de puissance, comme cela a été montré pour d'autres sports collectifs, et la seconde est que les séances d'entraînement reproduisent l'intensité des matchs.

Enfin troisièmement, au vu de nombre limité d'études sur le sujet, il semble pertinent de s'interroger sur la gestion de la CE mise en place dans le cadre d'une équipe élite de Handball afin de comprendre comment les entraîneurs s'organisent pour limiter l'impact du rythme du calendrier des rencontres sur les performances des joueurs. C'est ce que nous proposerons dans notre dernière étude pour approfondir les connaissances sur les stratégies de gestion de la CE mise en place en Handball. Cela permettra de mieux comprendre la dynamique de CE actuelle et ainsi être en mesure de mieux la réguler. Ainsi notre hypothèse de travail pour cette dernière étude sera que l'activité des joueurs, durant les séances d'entraînement, est régulée en fonction du rythme des matchs.

ÉTUDE 1 : VALIDITÉ DU SYSTÈME DE POSITIONNEMENT LOCAL À BANDE ULTRA- LARGE KINEXON™ POUR ÉVALUER LES MOUVEMENTS SPÉCIFIQUES AU HANDBALL

VALIDITY OF THE ULTRA-WIDEBAND LOCAL POSITIONING SYSTEM KINEXON™ TO ASSESS HANDBALL-SPECIFIC MOVEMENTS

Publication associée :

Antoine Fleureau, Mathieu Lacomme, Martin Buchheit, Antoine Couturier, and Giuseppe Rabita (2020). "Validity of an Ultra-Wideband Local Positioning System to Assess Specific Movements in Handball." *Biology of Sport*.

Communication associée :

Antoine Fleureau, Mathieu Lacomme, Martin Buchheit, Antoine Couturier, and Giuseppe Rabita (2019). "Validity of an Ultra-Wideband Local Positioning System to Assess Specific Movements in Handball." *À la Recherche de la Performance - La performance, terrain d'innovation*. INSEP

Objectif de l'étude

Nous avons pu montrer lors de notre revue de littérature que le suivi quotidien de la CE d'un joueur est nécessaire, en particulier dans les sports collectifs d'élite, pour optimiser la périodisation de l'entraînement, la prévention des blessures et l'organisation du retour au jeu des joueurs blessés. Cependant, il est nécessaire pour cela d'avoir des outils permettant de mesurer de manière précise l'activité des joueurs sur le terrain, à la fois durant les matchs et les entraînements. Par conséquent, le but de cette étude est d'examiner la validité concurrente d'un nouveau LPS (Kinexon™) pour une gamme de mouvements spécifiques au Handball en comparaison avec un système de référence, l'outil de capture du mouvement Vicon®. De plus, puisque nous avons montré des différences de validité de mesures pour des systèmes similaires au Kinexon™ selon leurs configurations, nous nous efforcerons de tester l'effet de l'emplacement sur le terrain (centre, optimale vs bord, non-optimale), afin d'obtenir une évaluation complète de ce nouvel LPS. Nous traduirons donc ces questionnements en une hypothèse de travail selon laquelle l'outil Kinexon™ présente une validité de mesure acceptable en comparaison à un système de référence, pour ce qui est des vitesses, accélérations et décélérations maximales. Toutefois nous partirons également de l'hypothèse que cette validité diminue en configuration non optimale pour le système (i.e. bord de terrain).

Méthodologie

Participants

Cinq sujets masculins, actifs, dont une partie faisant partie des partenaires du centre de formation, (âge : $29,2 \pm 4,1$ ans, taille : $1,76 \pm 0,11$ m et masse corporelle : $77,0 \pm 8,0$ kg) se sont portés volontaires pour participer à cette étude. La possibilité de faire intervenir ici des joueurs issus de l'effectif de l'équipe de Nationale 1 a été rendu possible par l'accord de l'entraîneur et du préparateur physique de l'équipe, ce que nous n'avons malheureusement pas été en mesure d'obtenir pour les joueurs sous contrat (i.e. centre de formation et professionnel).

Protocole expérimental

Afin de tester la validité des mesures à la fois en condition optimale et non-optimale, le protocole expérimental a été répété deux fois. Tout d'abord au centre du terrain de Handball,

puis au bord, deux jours plus tard. Au cours de ces sessions les participants ont effectué dix répétitions de chacun des trois types de mouvements, décrits ci-après. Ces déplacements ont été sélectionnés pour leur capacité à être représentatifs de l'activité Handball et afin de tester les capacités de mesures du LPS selon les différents axes du plan.

- Sprints : il s'agissait d'accélération maximale sur un parcours linéaire de 25 m avec un départ debout. Après 20 m de course, les participants devaient décélérer sur 5 m pour s'arrêter complètement et rester immobiles (cf. Figure 28 A). Ces déplacements avaient pour but de vérifier la validité des mesures selon un premier axe du plan (la longueur du terrain) mais également dans le cadre des plus hautes vitesses, accélérations et décélérations que les joueurs peuvent produire.
- Déplacements Latéraux : il s'agissait d'un déplacement sous forme d'aller-retours médio-latéral sur 3 m (cf. Figure 28 B). Ce déplacement avait pour but de tester la validité des mesures selon le second axe du plan (la largeur du terrain).
- Déplacements Spécifique au Handball : il s'agissait ici de reproduire une action typique d'arrière latéral au Handball à savoir, l'engagement-désengagement dans l'intervalle interne suivi d'un réengagement dans l'intervalle externe. L'intervalle interne représente l'espace entre les défenseurs numéros 2 et 3 tandis que l'intervalle externe correspond à l'espace entre les défenseurs numéros 1 et 2. Le défenseur numéro 2 est simulé par un espace de 2 m que les participants doivent contourner pour ensuite terminer par un saut à une jambe (cf. Figure 28 B). Ce dernier type de déplacement avait pour but de tester la validité du LPS en condition réaliste, et sur des déplacements impliquant simultanément les deux axes du plan.

Matériel

Puisque nous souhaitions tester différents types de déplacements il nous a fallu définir des protocoles expérimentaux spécifiques pour chacun d'eux. Ainsi nous avons dû établir une configuration du système de référence Vicon® pour la mesure des sprints et une autre qui s'est avérée suffisante pour les deux autres types de déplacements analysés. Le système Kinexon™ était quant à lui configuré spécifiquement pour effectuer ses mesures sur l'ensemble du terrain de Handball. Cette configuration a été faite par la société productrice du système. Pour l'ensemble des essais, les participants portaient simultanément une balise réceptrice reliée aux

antennes Kinexon™, et cinq marqueurs réfléchissants passifs détectables par le système de capture de mouvement Vicon®.

Outil LPS Kinexon™ à bande ultra-large

Le système utilisé dans cette étude était composé de 14 antennes positionnées autour du terrain de Handball (le stade Pierre de Coubertin à Paris) à trois hauteurs différentes. La balise Kinexon™ était portée à l'aide d'une brassière ajustée au corps fournie par la société Kinexon™, positionnant la balise entre les omoplates du sujet. Les données ont été collectées à une fréquence de 20 Hz et traitées via le logiciel spécifique Kinexon™ Software. Les signaux ont été transmis aux antennes en utilisant la technologie UWB dans une gamme de fréquences de 4,25-7,25 GHz. La position sur le terrain de la balise a été calculée par un algorithme défini par la société Kinexon™, basé sur une combinaison de différentes méthodes telles que la différence de temps d'arrivée, le Two-Way Ranging et l'angle d'arrivée.

Système d'analyse de mouvement Vicon

Un système d'analyse du mouvement Vicon® à 12 caméras (Vicon® Nexus T40, ©Vicon® Motion Systems, Oxford Metrics, UK) a été mis en œuvre dans les deux configurations utilisées. Afin de s'assurer du bon fonctionnement de cet outil pour nos manipulations, nous avons effectué plusieurs sessions de tests pour pouvoir se familiariser avec l'installation et le paramétrage de celui-ci, définir les configurations les plus efficaces pour les différents types de mouvement étudiés et être en mesure d'enchaîner les différentes installations en un temps minimal. Les sessions d'enregistrements des données se sont déroulés sur deux jours, chacun découpé en deux temps. Un premier temps correspondant à la configuration du système pour les déplacements latéraux et spécifiques, et un second pour celle permettant la mesure des sprints. Pour chacune de ces configurations, nous avons dû placer et calibrer les caméras afin d'assurer une qualité suffisante des données recueillies. Les données ont été collectées à 250 Hz. Les cinq marqueurs passifs portés par les sujets étaient placés de telle manière à former une croix dont le centre correspondait à la position de la balise Kinexon™ et était marqué par un marqueur spécifique. Deux marqueurs étaient donc placés sur les têtes d'acromions sur les épaules, un marqueur était placé à la base du cou (au niveau de la vertèbre cervicale C7) et le dernier était placé en bas du dos (sur la vertèbre lombaire L4). Ces quatre derniers marqueurs servaient à fournir une sécurité pour garantir la prise de mesure par le Vicon® tout au long des

sessions de test. En effet ils permettaient de retrouver la position du marqueur placé sur la balise Kinexon® en cas de perte de signal sur celui-ci. Néanmoins, puisque la perte du signal du marqueur placé sur la balise Kinexon™ n'a jamais dépassé 25 images successives (soit 0,1s), nous n'avons jamais eu besoin de recalculer sa position à partir des données des quatre autres marqueurs. Nous avons pu simplement et automatiquement extrapolé les données manquantes à l'aide du logiciel Vicon® 3D en utilisant la position du marqueur immédiatement avant et après la perte de signal. Les erreurs moyennes de calibrage du Vicon® pour les deux sessions de test étaient de 0,09 et 0,17 mm pour les données recueillies au centre du terrain, et de 0,08 et 0,16 mm pour celles recueillies au bord du terrain. Ces erreurs de mesures restaient donc tout à fait acceptables pour pouvoir effectuer les mesures avec cet outil et les considérer comme référence pour notre étude.

Traitement des données

À partir de ces deux systèmes nous avons pu, à la suite de chacun des enregistrements individuels, récupérer un fichier regroupant les données du passage du sujet. Ces fichiers étaient de type .csv pour le système Kinexon™ et de type .c3d pour le Vicon®. Ces deux types de fichiers regroupent l'ensemble des données de position instantanée selon les deux axes du plan, au cours du temps. Toutefois il était nécessaire de faire passer le fichier .c3d du Vicon® par un outil intermédiaire pour récupérer un fichier .csv exploitable pour le traitement des données. Ici nous avons choisi d'utiliser le logiciel Mokka pour sa simplicité d'utilisation et l'option de visualisation en 3D de la position de chaque capteur au cours du temps. Une fois que l'on a récupéré les différents fichiers .csv, il est alors possible de commencer le traitement des données à proprement parler. Pour être en mesure de comparer les données des deux systèmes il nous était nécessaire d'avoir des données aux mêmes fréquences, ayant subi les mêmes filtrages et synchronisés. Nous avons donc commencé par suréchantillonner les données du Kinexon™ pour les faire passer d'un échantillonnage à 20 Hz à 250 Hz. Afin de pouvoir faire passer les mêmes filtres sur les données issues du Vicon®, que nous récupérons brut, que ceux appliqués par Kinexon™ sur leurs données, nous avons demandé à la société de nous partager cette information. Ainsi nous avons pu apprendre que le filtrage effectué s'appuyait sur un filtre Butterworth passe-bas à déphasage nul de 3^{ème} ordre avec une coupure de 10 Hz. Nous avons donc fait passer ce filtre sur les données du Vicon® pour avoir des données ayant subi des traitements identiques. Nous avons également fait passer ce filtre sur les données

suréchantillonnées de Kinexon™ afin de retrouver les données initiales mais simplement passées de 20 Hz à 250 Hz. À la suite de cela, chaque paire de données Kinexon™ et Vicon® pour chaque répétition de mouvement a été synchronisée manuellement pour déterminer un début et une fin communs. Il nous a été nécessaire de faire cela manuellement car cela était très complexe à automatiser, et donc aussi chronophage que de le faire manuellement, du fait des données de sprint qui étaient trop similaires les unes avec les autres, et avec certaines parties d'autres mouvements. Pour finir le traitement de données, nous avons effectué les calculs des différentes variables que nous souhaitons analyser, à savoir la distance parcourue et les maximums de vitesse d'accélération et de décélération. Pour cela nous avons calculé la distance parcourue comme la somme des positions instantanées dans le plan horizontal (x, y). Les signaux de vitesse et d'accélération ont ensuite été obtenus par dérivation successive et filtrage passe-bas (10 Hz, filtre Butterworth à déphasage nul de 3^{ème} ordre) des données de position. Les pics de vitesse, d'accélération et de décélération ont été calculés à partir de ces données, à l'aide d'une moyenne mobile de 500ms passée sur l'ensemble des signaux. Ainsi les pics de vitesse et d'accélération correspondent aux maximums de cette moyenne mobile pour les signaux de vitesse et d'accélération respectivement. Le pic de décélération correspond lui au minimum de cette moyenne mobile appliquée au signal d'accélération. Nous avons donc ainsi obtenu quatre variables à analyser pour chacun des essais.

Analyse statistique

Pour effectuer cette analyse nous nous sommes appuyées sur le tableur d'Hopkins afin de comparer la concordance entre les deux systèmes par régression linéaire. Nous avons choisi de comparer le système Kinexon™ au Vicon® à partir du biais moyen et standardisé, du coefficient de corrélation de Pearson et de la TEE exprimée d'abord en valeur absolue, puis normalisée et sous forme de coefficient de variation (CV). L'ensemble de ces données ont été calculées avec leur intervalle de confiance à 90 %. Les critères suivants ont été adoptés pour interpréter l'ampleur des coefficients de corrélations (r) : $\leq 0,01$: nuls ; $> 0,1$: petits ; $> 0,3$: modérés ; $> 0,5$: grands ; $> 0,7$: très grands ; et $> 0,9$: presque parfaits. La moitié du seuil de l'échelle de Cohen modifiée a été utilisée pour interpréter la TEE standardisée : $> 0,01$ (insignifiante) $> 0,1$ (petite), $> 0,3$ (modérée), $> 0,6$ (grande), $> 1,0$ (très grande) et $> 2,0$ (extrêmement grande). En ce qui concerne l'interprétation du biais standardisé, les valeurs seuils étaient celles de l'échelle de Cohen modifiée : $0,01$ (trivial) ; $> 0,2$ (petits) ;

> 0,6 (modérés) ; > 1,2 (grands) ; > 2,0 (très grands) ; > 4,0 (extrêmement grands). Nous avons choisi ces paramètres à analyser (i.e. biais moyen et standardisé, TEE moyenne et standardisée et en CV, coefficient de corrélation) car ce sont les plus fréquemment utilisés dans les études de validation d'outils GPS ou LPS, ce qui nous permet de pouvoir comparer nos résultats avec ceux d'autres études similaires.

Résultats

Les résultats marquant de cette étude sont, pour ce qui est des analyses au centre du terrain, des biais standardisés et des TEE petits à modérés (biais : $0,38 \pm 0,03$ — $1,14 \pm 0,21$; TEE : $0,06 \pm 0,02$ — $0,48 \pm 0,18$) ainsi que des coefficients de corrélation presque parfaits ($0,90 \pm 0,06$ — $1,00 \pm 0,00$) pour l'ensemble des variables et mouvements analysés hormis dans le cas des décélérations en déplacements spécifique au Handball (cf. Tableau 5). Dans ce cas particulier, le biais était trivial ($0,01 \pm 0,34$) tandis que la TEE était très grande ($1,29 \pm 1,26$) et le coefficient de corrélation était grand ($0,61 \pm 0,26$).

Les résultats au bord du terrain étaient globalement similaires hormis dans le cadre des sprints (cf. Tableau 6). Ainsi les biais standardisés étaient petits à modérés ($0,24 \pm 0,05$ — $1,10 \pm 0,23$) pour toutes les variables lors des déplacements latéraux et pour les accélérations et décélérations maximales en déplacements spécifiques mais grands ($2,85 \pm 0,24$) pour la vitesse maximale lors de ce mouvement. Pour ces deux types de déplacements, les TEE étaient toutes petites à modérées ($0,10 \pm 0,04$ — $0,47 \pm 0,25$) et les coefficients de corrélation étaient également tous presque parfaits ($0,91 \pm 0,09$ — $0,99 \pm 0,00$). Les résultats étaient équivalents en ce qui concerne les mesures de vitesse maximale en sprint (biais : $0,84 \pm 0,08$; TEE : $0,26 \pm 0,09$; $r : 0,97 \pm 0,02$), mais étaient inférieurs dans le cadre des accélérations et décélérations maximales. Dans ce cas, les biais standardisés étaient modérés à très grands ($0,91 \pm 0,35$ — $6,73 \pm 0,61$), les TEE étaient très grandes ($2,56 \pm 21,15$ — $3,96 \pm 3,81$) et les coefficients de corrélation étaient petits ($0,25 \pm 0,33$ — $0,36 \pm 0,30$).

Discussion

Au regard de la littérature scientifique concernant la validité des mesures d'outils LPS, seuls trois études peuvent servir de référence de comparaison. D'une part les études de Serpiello et al. (2017) et de Luteberget et al. (2018) portant sur deux autres outils LPS, et d'autre part, une

étude postérieure à la nôtre, celle de Blauberger et al (2021) portant sur l’outil LPS Kinexon™. Nos résultats sont similaires ou meilleurs que ceux obtenus par Serpiello et Luteberget, et logiquement similaire à ceux de Blauberger, pour l’ensemble des variables et conditions observées (cf. Tableau 4). Il est important de noter que l’étude de Serpiello a montré des différences de mesure comprise entre 0,5 % et 16 %, hormis dans le cadre des décélérations, dans les mêmes conditions mais avec un outil LPS calibré à 10 Hz. Luteberget a, quant à lui, montré pour un outil LPS calibré à 20 Hz des différences systématiquement > 20 % dans des conditions équivalentes. La mise en relation de ces résultats avec les nôtres pose question puisque nous utilisons également un LPS configuré à 20 Hz. Néanmoins, nous pouvons justifier la grande différence de nos résultats et de ceux de Serpiello avec ceux de Luteberget par la méthodologie employée. En effet, ce dernier s’est appuyé sur un système d’antennes mobiles tandis que Serpiello et nous nous sommes basés sur des configurations fixes, mises en place par le constructeur. Ainsi, alors que nous disposons d’un outil validé par le constructeur en configuration optimale pour le site de test incorporant un serveur dédié pour mener à bien les calculs du système, Luteberget ne disposait que d’une configuration modulable à souhait, et surtout ne disposant pas d’un serveur dédié pour les calculs.

		Centre Terrain	Bord Terrain
Nos Résultats	Vitesse (Max)	2,1 — 4,6 %	2,4 -- 9,6 %
	Accélération (Max)	3,8 — 7,3 %	7,1 -- 11,9 %
	Décélération (Max)	0,4 — 5,4 %	6,1 -- 38,8 %
Serpiello et al. (2017)	Vitesse (Max)	0,5 — 13 %	2,4 -- 16 %
	Accélération (Max)	6,8 — 8,9 %	8,5 -- 14 %
	Décélération (Max)	26 — 28 %	7,8 -- 36 %
Luteberget et al. (2018)	Vitesse (Moy)	0,5 — 2,8 %	14,7 -- 29,1 %
	Vitesse (Max)	33,5 — 39,2 %	74,4 -- 90,8 %
Blauberger et al. (2021)	Vitesse (Max)	0,7 — 1,7 %	
	Accélération (Max)	0,5 -- 10,2 %	
	Décélération (Max)	0,1 -- 4,3 %	

Tableau 4 : Pourcentage de Différence entre le LPS testé et le Système de Référence.

Par ailleurs, les différences de précision des mesures lors des accélérations et décélérations en bord de terrain nous amènent également à nous interroger sur les raisons pouvant engendrer de telles différences de mesure selon la configuration testée. Nous pouvons subodorer deux raisons principales à ces différences. La première, la plus évidente, est que le fait de se trouver à équidistance, ou presque, des différents récepteurs favorise la mesure en permettant la détection de la balise par l’ensemble des antennes. Ainsi, puisque l’ensemble de ces dernières sont à même de détecter la balise cela enrichie la mesure de la position et assure une validité maximale à cette mesure. Au contraire, la détection uniquement par une partie des antennes de la balise

en bord de terrain limite la capacité du système à assurer une mesure précise de la position. Il s'agit alors simplement de l'impact du nombre de récepteurs en mesure de capter le signal des balises qui impact la qualité de la mesure effectuée. Cette première hypothèse semble tout à fait acceptable au regard de la littérature scientifique sur le sujet et en particulier les études menées par Serpiello et Luteberget qui proposent des explications similaires pour leurs études de validité d'autres LPS. Pour bien comprendre la seconde raison que nous avançons, il est important de revenir au principe de fonctionnement des LPS. Comme nous l'avons vu en revue de littérature (cf. 2.2 Les outils GPS & LPS), afin de mesurer la position des balises, ces LPS s'appuient sur des calculs de différences temporelles. Or, en plus de limiter le nombre d'antennes en mesure de détecter la balise, la position en bord de terrain, en rapprochant l'émetteur et le récepteur, diminue la distance parcourue et donc le temps de parcours de l'onde émise par la balise. Cela a pour effet de diminuer le temps disponible pour le récepteur pour effectuer le calcul de la position entre la réception de deux ondes émises, atteignant ainsi les limites de capacité de calcul des processeurs et engendrant ponctuellement des erreurs de mesures. Ces dernières n'étant pas systématiques, cela n'impacte ni les capacités de mesure de la position, ni celle de la vitesse malgré le calcul par dérivation effectué. Toutefois, du fait de la double dérivation des données de position pour l'obtention du signal d'accélération, ces erreurs ponctuelles se retrouvent trop décuplées et engendrent des erreurs de mesure importantes. En effet, la dérivation mathématique a pour particularité d'accentuer les erreurs de mesures du signal d'origine, comme le démontre le théorème de Taylor-Lagrange. Ainsi lorsque l'on multiplie ce type de calcul, les erreurs qui étaient initialement négligeables se retrouvent si accentuées qu'elles en viennent à dégrader la précision de la mesure de manière perceptible. Nous nous permettons de penser que le cumul de ces deux facteurs permet d'expliquer les erreurs de mesures du système Kinexon™ dans le cas des accélérations et décélérations maximales en bord de terrain. L'étude actuelle n'a pas été conçue pour isoler les différentes sources potentielles d'erreurs de mesure, ainsi les résultats de cette étude montrent la somme des erreurs cumulées de toutes les sources. De plus, afin de pouvoir valider notre seconde hypothèse justificative, il serait nécessaire de proposer une nouvelle étude permettant d'approfondir la connaissance des capacités de calculs des processeurs incluses dans les récepteurs.

Limites

La principale limite que nous pouvons remarquer pour notre étude est le fait de ne pas avoir testé la validité du système Kinexon™ près du point de penalty, alors qu'il s'agit d'une position centrale autour de laquelle les phases offensives s'articulent tandis que le centre du terrain n'est qu'un lieu de passage des joueurs. Toutefois, nos résultats ne permettent pas de mettre en évidence de différences significatives entre les mesures effectuées au centre et au bord du terrain pour les déplacements latéraux et spécifiques. Or, ce sont les types de déplacements les plus employés par les joueurs autour du point de penalty, il nous semble donc approprié de supposer que la validité des mesures du système Kinexon™, à cet endroit spécifique, aurait été similaire à celle obtenue sur les deux zones testées.

Conclusion

Nous pouvons donc valider nos hypothèses de travail, en affirmant que le LPS Kinexon™ présente une validité acceptable, en comparaison au système de référence Vicon®, pour évaluer l'activité locomotrice spécifiques au Handball, au travers des mesures de vitesse, accélération et décélération maximale. Nous nous permettons toutefois d'ajouter qu'il convient d'être prudent pour ce qui est des mesures des accélérations et décélérations maximales sur le bord du terrain lors les sprints, telles qu'elles peuvent apparaître en contre-attaque pour les ailiers. Ceci confirme également notre hypothèse de travail sur la diminution de la validité des mesures en condition non optimale (bord de terrain) pour le système.

Applications pratiques

Puisque nous avons pu démontrer une validité suffisante du système Kinexon™ pour mesurer les vitesses, accélérations et décélérations maximales, il nous semble normal de préconiser l'utilisation de cet outil dans le cadre du suivi de l'activité des joueurs de Handball et leur CE au quotidien. Nous attirons toutefois l'attention des praticiens sur l'importance de traiter certaines données avec précaution, notamment les accélérations et décélérations des ailiers, dont le niveau de précision s'est avéré inférieur.

Validity of an ultra-wideband local positioning system to assess specific movements in handball

AUTHORS: Antoine Fleureau^{1,2}, Mathieu Lacomme^{1,2}, Martin Buchheit^{1,2}, Antoine Couturier², Giuseppe Rabita²

¹ Performance Department, Paris Saint Germain, Saint-Germain-En-Laye, France

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

ABSTRACT: The aim of this study was to examine the concurrent validity of the Kinexon local positioning system (LPS) in comparison with the Vicon motion capture system used as the reference. Five recreationally active men performed ten repetitions of linear sprints, medio-lateral side-to-side and handball-specific movements both in the centre and on the side of an indoor field. Validity was assessed for peak speed, peak acceleration and peak deceleration using standardised biases, Pearson coefficient of correlation (r), and standardised typical error of the estimate. With the exception of peak decelerations during specific movements in the centre and peak acceleration and deceleration during linear sprints on the side of the field, the standardised typical error of the estimate (TEE) values were all small to moderate (0.06–0.48), standardised bias ranged between 0.01 and 2.85 and Pearson coefficient values were all > 0.90 for all variables in all conditions. Peak acceleration and deceleration during linear sprints on the side of the field showed the largest TEEs and the greatest differences between the two systems. The ultra-wideband based (UWB) local positioning system had acceptable validity compared with Vicon to assess players' movements in handball with the exception of high accelerations and decelerations during linear sprints on the side of the field.

CITATION: Fleureau A, Lacomme M, Buchheit M et al. Validity of an ultra-wideband local positioning system to assess specific movements in handball. *Biol Sport*. 2020;37(4):351–357.

Received: 2020-04-01; Reviewed: 2020-05-11; Re-submitted: 2020-06-09; Accepted: 2020-06-12; Published: 2020-07-05.

Corresponding author:

Antoine Fleureau
Performance Department, Paris
Saint Germain, Saint-Germain-
En-Laye, France
E-mail: antoinefleureau@live.fr

Key words:

Ultra-wideband
Concurrent validity
Kinexon
Vicon
Indoor sport

INTRODUCTION

In elite team sports, daily monitoring of a player's physical load is needed to optimize the periodization of training, prevent injuries and organize the player's return to play [1, 2]. Over the past two decades, the use of Global Positioning Systems (GPS) has grown exponentially to measure players' external load using mainly locomotion-related variables (e.g. distance travelled, speed and acceleration of locomotion) [2–5]. However, while GPS systems offer the great advantage of being portable and non-invasive, they remain unusable in indoor conditions.

For indoor sports, many other technological solutions are now available to monitor player's movements using for example local positioning systems (LPS). Many of them (e.g., radio frequency identification, wireless local area network or Bluetooth) are unfortunately not suitable for precise position measurements due to a lack of accuracy, instability or interference issues [6]. Recently, new tools based on ultra-wideband technology (UWB) have been developed specifically to track players' position indoor. However, the validity of the different tools using this technology is still questionable. Two groups of researchers examined, in indoor conditions, the concurrent

validity of the ClearSky LPS based on UWB technology (using 10 or 20 Hz sampling frequency) using a motion capture device (100 Hz motion capture system, Vicon or Qualisys) as the reference criterion [7, 8]. The system was assessed during linear movements at different speeds and successive 45° changes of direction. The main results of the Serpiello et al. study [7] were that the LPS had acceptable validity for evaluating locomotor patterns of indoor sports compared to motion capture systems. Differences vs. the Vicon were in the range of 0.2–12.0%, with a typical error of the estimate (TEE) between 1.2 and 9.3% for distance, mean/peak speed, and mean/peak acceleration. Luteberget et al. [8] showed LPS measurements to be more representative of the player's position and displacements in the centre of the playing field than on the sides. There were substantial differences in comparison to the criterion for both distances travelled and average speed, which were greater on the side of the court (15–30%) than in the centre (1–3%). However, it was concluded that the ClearSky system could be considered as valid from those later studies. Another LPS system, Kinexon (Kinexon GMBH, Munich, Germany) may be preferred for various reasons including

its supposed better ability to measure acceleration and decelerations and the reduced size of the chips worn by the athletes in comparison with the ClearSky system. The validity of the Kinexon LPS UWB-based system, studied by Hoppe *et al.* [9], was in fact shown to be better than that of two other GPS systems, which were previously considered as 'valid' [5, 10–13]. The main result of this study was a TEE for the distance covered of 1.0–6.0% for the LPS system versus 1.6–8.0% and 3.0–12.9% for the two GPS systems. Unfortunately, in this latter study, locomotor patterns (including maximal velocity, acceleration, or deceleration) were only examined using overall distance covered and timing gates. Furthermore, they did not test the effect of the field location (centre vs. side) on this validity.

Therefore, the purpose of this study was to examine the concurrent validity of the UWB Kinexon positioning system during a range of handball-specific movements in comparison to the Vicon motion capture system used as the reference. The effect of the field location (centre vs. side) was also examined.

MATERIALS AND METHODS

Participants and experimental overview

Five recreationally active male subjects (age: 29.2 ± 4.1 years, height: 1.76 ± 0.11 m, and body mass: 77.0 ± 8.0 kg) volunteered to participate in this study. The participants were informed of the purposes, procedures, and potential risks of the study and provided

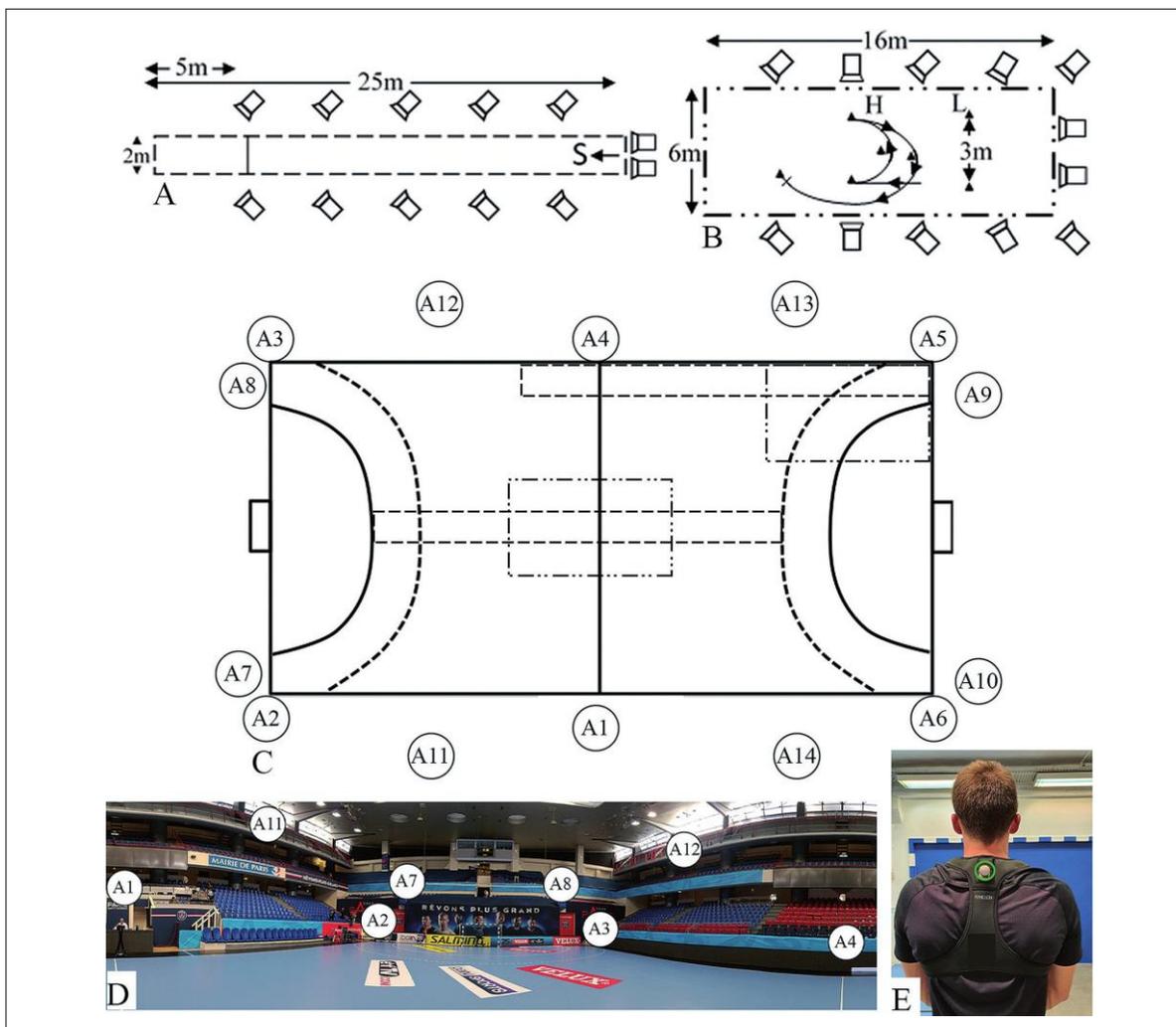


FIG. 1. A: Position of the Vicon camera on configuration for sprints (—); B: Position of the Vicon camera on configuration for lateral and specific movements (---); C: Schematic position of the Kinexon antennas and position of testing zones on the field; D: Position of Kinexon antennas; E: Position of the Vicon reflective marker on the Kinexon tag

Validity of the local positioning system Kinexon

consent of their approval to participate. All the procedures were conducted in accordance with the Declaration of Helsinki.

Experimental protocol

A first session was carried out in the centre of an indoor handball playing field during which the participants performed three types of movements, as described below. Two days after, a second session was carried out with the same protocol located on the side of the field.

Locomotion activities

Participants performed three different activities repeated ten times in the following order:

- S: Maximal acceleration over a linear course of 25 m with a standing start. After 20 m of running, participants had to decelerate over 5 m and stand still (Figure 1.A).
- L: Lateral movements in the form of medio-lateral side-to-side movement over 3 m (Figure 1.B)
- H: Handball-specific movement in the form of engagement-disengagement in an interval of 2 m, followed by a reengagement out this interval finished by a one-legged jump (Figure 1.B)

Materials

The validity of the Kinexon (Kinexon GmbH, Munich, Germany) was examined while comparing the raw data collected with those obtained

using the Vicon. For each test session, two configurations of the Vicon were used, one for lateral and specific movements (Figure 1.A) and one for the sprints (Figure 1.B). In all trials, participants wore simultaneously both a receiver tag connected to the Kinexon antennas and a passive reflective marker to be detected by the motion Vicon capture system.

Kinexon Ultrawide band system

The system used in this study consisted of 14 antennas positioned around the handball playing field (i.e., Coubertin Indoor Stadium, Paris) at three different heights, as shown in Figure 1.C&D. The tag was placed in the centre of the upper back using the manufacturer harness. The data were collected at 20 Hz and processed via the specific Kinexon Software. The signals were transmitted to the antennas using UWB technology in a frequency range of 4.25–7.25 GHz. The field position of the tag was calculated by a proprietary algorithm based on a combination of different methods such as Time Difference of Arrival, Two-Way Ranging and Angle of Arrival [14].

Vicon motion capture system

A 12-camera Vicon motion analysis system (Vicon Nexus T40, Vicon Motion Systems, Oxford Metrics, UK) was implemented in the two configurations shown in Figure 1.A&B. Data were collected at 250 Hz. Only one 14 mm reflective marker (B&L Engineering, Santa Ana, USA) was placed on the Kinexon tag as shown in Figure 1.E.

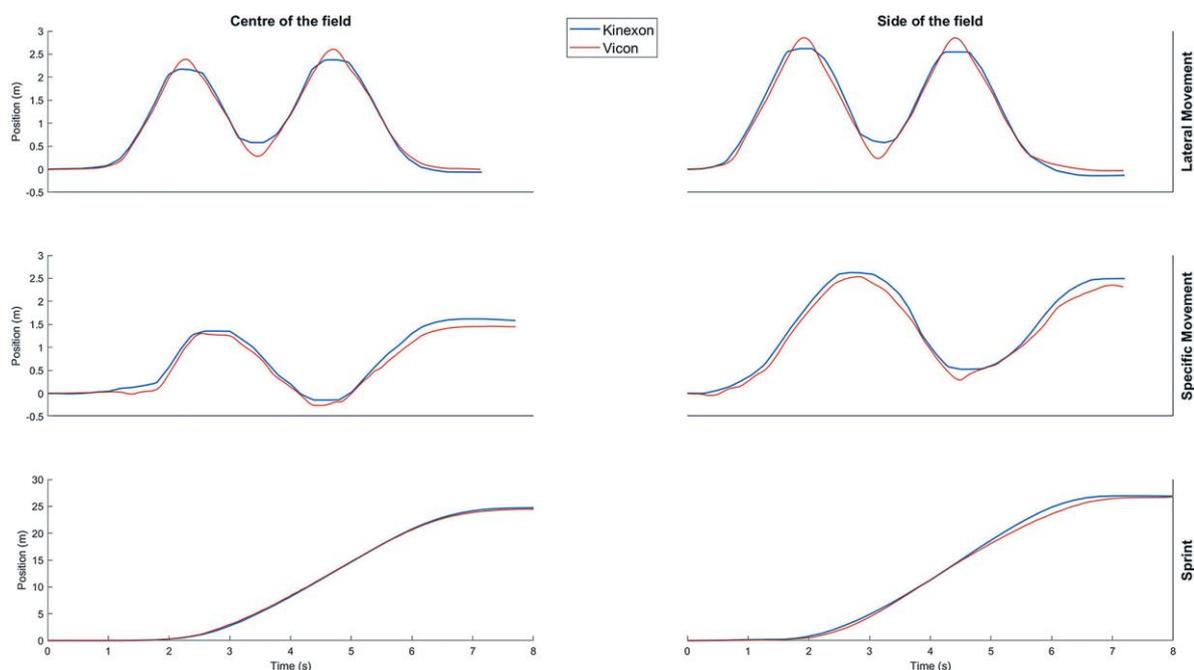


FIG. 2. Synchronized position data of the two systems (Kinexon and Vicon) both in the centre and on the side of the court, for each type of movement.

The data obtained from the three-dimensional marker position were used for further analysis. The loss of the marker signal was never longer than 25 successive images (i.e., 0.1 s) and automatically extrapolated with the Vicon 3D software using the marker position immediately before and after the loss.

The average Vicon calibration errors (Image and World Error, respectively) for the two test sessions were 0.09 and 0.17 mm for data collected in the centre of the field, and 0.08 and 0.16 mm for those collected on the side of the field.

Data processing

Figure 2 illustrates, for one trial, the position signal obtained from both systems. The original datasets from Kinexon were oversampled from 20 to 250 Hz for subsequent fine synchronization with Vicon data. Signals from both systems were then filtered using a 3rd order zero phase shifting low pass Butterworth filter with a 10 Hz cut-off. Each pair of Kinexon and Vicon data sets for each movement repetition was manually synchronized to determine a common start and end. The distance travelled was then calculated as the sum of the instantaneous positions in the horizontal plane (x, y). Velocity and acceleration data were obtained by successive derivation and low pass filtering (10 Hz, 3rd order zero phase shifting Butterworth filter)

of position data. Peaks in speed, acceleration and deceleration were calculated from the raw data and utilised for the analysis. They were respectively computed as the maximum mean speed, acceleration and deceleration over a 500 ms window [10, 15, 16].

Statistical analysis

The Hopkins spreadsheet [17] was used to compare the agreement between the two systems by linear regression. We compared the Kinexon system (practical) with the Vicon (criterion) while computing the mean and standardised bias, the Pearson correlation coefficient and the typical error of the estimate (TEE) expressed first as the absolute value, then normalized and as a coefficient of variation (CV), provided together with a 90% confidence interval. The following criteria were adopted to interpret the magnitude of the correlations: ≤ 0.01 , trivial; > 0.1 , small; > 0.3 , moderate; > 0.5 , large; > 0.7 , very large; and > 0.9 , almost perfect. Half the threshold of the modified Cohen scale was used to interpret the standardised TEE: > 0.01 (trivial) > 0.1 (small), > 0.3 (moderate), > 0.6 (large), > 1.0 (very large), and > 2.0 (extremely large) [17]. Regarding standardised bias interpretation, threshold values were the modified Cohen scale: 0.01 (trivial); > 0.2 (small); > 0.6 (moderate); > 1.2 (large); > 2.0 (very large); > 4.0 (extremely large) [17].

TABLE 1. Comparison of peak speed, peak acceleration, and peak deceleration between Kinexon and Vicon during three different locomotion activities performed in the centre of an indoor court.

	Movement	Mean \pm SD Vicon	Mean \pm SD Kinexon	Mean Bias \pm CI	Standardised Bias \pm CI	TEE \pm CI	Standardised TEE \pm CI	TEE as CV (%) \pm CI	Pearson correlation (r) \pm CI
Centre of the field									
Peak Speed (m·s ⁻¹)	Sprint Lateral Specific	7.0	7.2	0.15	0.38	0.02	0.06	0.3	1.00
		± 0.4	± 0.4	± 0.01	± 0.03	± 0.01	± 0.02	± 0.1	± 0.00
		2.1	2.0	-0.09	-1.14	0.03	0.44	1.6	0.92
		± 0.1	± 0.1	± 0.02	± 0.21	± 0.01	± 0.18	± 0.4	± 0.06
Peak Acceleration (m·s ⁻²)	Sprint Lateral Specific	2.6	2.7	0.12	0.63	0.05	0.25	1.9	0.97
		± 0.2	± 0.2	± 0.02	± 0.10	± 0.03	± 0.11	± 0.6	± 0.03
		3.5	3.6	0.19	0.60	0.05	0.15	1.4	0.99
		± 0.3	± 0.3	± 0.02	± 0.05	± 0.01	± 0.05	± 0.3	± 0.01
Peak Deceleration (m·s ⁻²)	Sprint Lateral Specific	3.7	3.6	-0.14	-1.10	0.06	0.48	1.5	0.90
		± 0.1	± 0.2	± 0.03	± 0.27	± 0.01	± 0.18	± 0.4	± 0.06
		3.7	4.0	0.27	0.60	0.10	0.23	2.8	0.97
		± 0.5	± 0.4	± 0.04	± 0.09	± 0.03	± 0.10	± 0.9	± 0.02
Peak Deceleration (m·s ⁻²)	Sprint Lateral Specific	4.1	4.4	0.22	0.39	0.08	0.14	2.0	0.99
		± 0.6	± 0.7	± 0.04	± 0.07	± 0.02	± 0.05	± 0.5	± 0.01
		3.9	3.7	-0.14	-0.99	0.06	0.44	1.5	0.92
		± 0.1	± 0.2	± 0.02	± 0.17	± 0.01	± 0.16	± 0.4	± 0.05
Peak Deceleration (m·s ⁻²)	Sprint Lateral Specific	2.5	2.5	0.00	0.01	0.12	1.29	5.0	0.61
		± 0.2	± 0.1	± 0.05	± 0.34	± 0.04	± 1.26	± 1.6	± 0.26

Note: SD: Standard deviation, CI: 90% Confidence Interval, TEE: Typical Error of the Estimate, CV: Coefficient of Variation

Validity of the local positioning system Kinexon

TABLE 2. Comparison of peak speed, peak acceleration, and peak deceleration between Kinexon and Vicon during three different locomotion activities performed on the side of an indoor court.

	Movement	Mean ± SD Vicon	Mean ± SD Kinexon	Mean Bias ± CI	Standard- ised Bias ± CI	TEE ± CI	Standard- ised TEE ± CI	TEE as CV (%) ± CI	Pearson correlation (r) ± CI
Side of the field									
Peak Speed (m·s ⁻¹)	Sprint Lateral Specific	7.1	7.3	0.17	0.84	0.05	0.26	0.7	0.97
		± 0.2	± 0.2	± 0.02	± 0.08	± 0.01	± 0.09	± 0.2	± 0.02
		1.9	1.9	-0.07	-0.24	0.04	0.16	2.1	0.99
		± 0.3	± 0.3	± 0.01	± 0.05	± 0.01	± 0.06	± 0.6	± 0.01
		2.4	2.6	0.23	2.85	0.04	0.47	1.5	0.91
		± 0.1	± 0.1	± 0.02	± 0.24	± 0.01	± 0.25	± 0.5	± 0.09
Peak Acceleration (m·s ⁻²)	Sprint Lateral Specific	4.4	4.0	-0.38	-0.91	0.39	2.56	9.4	0.36
		± 0.4	± 0.3	± 0.15	± 0.35	± 0.10	± 21.15	± 2.6	± 0.30
		3.2	2.8	-0.38	-0.51	0.08	0.11	2.7	0.99
		± 0.7	± 0.9	± 0.06	± 0.09	± 0.02	± 0.04	± 0.7	± 0.00
		3.5	3.7	0.25	1.10	0.08	0.34	2.3	0.95
		± 0.2	± 0.3	± 0.05	± 0.23	± 0.02	± 0.15	± 0.7	± 0.04
Peak Deceleration (m·s ⁻²)	Sprint Lateral Specific	3.2	4.5	1.24	6.73	0.18	3.96	5.7	0.25
		± 0.2	± 0.3	± 0.11	± 0.61	± 0.05	± 3.81	± 1.6	± 0.33
		3.4	3.2	-0.27	-0.45	0.06	0.10	1.9	0.99
		± 0.6	± 0.6	± 0.03	± 0.04	± 0.02	± 0.04	± 0.5	± 0.00
		2.6	2.4	-0.16	-0.33	0.14	0.29	5.5	0.96
		± 0.5	± 0.5	± 0.05	± 0.11	± 0.04	± 0.13	± 1.7	± 0.03

Note: SD: Standard deviation, CI: 90% Confidence Interval, TEE: Typical Error of the Estimate, CV: Coefficient of Variation

RESULTS

Table 1 presents mean and standard deviation of peak speed, peak acceleration and peak deceleration in the centre of the playing field during sprints, lateral and handball-specific movements, as well as the respective bias, TEE and correlations between values obtained from practical (Kinexon) and criterion (Vicon) systems. Standardised biases were small to moderate for all variable for all movements and trivial for deceleration during the specific movement. The standardised TEEs were small to moderate for all variables during all movements, except for peak deceleration during specific movement, which was only very large. The magnitude of the correlations was almost perfect for all analyses except for peak deceleration during specific movements, which was only large.

Table 2 presents the results from the data recorded on the side of the field. Standardised biases were also small to moderate for all variables (peaks in speed, acceleration, and deceleration) during lateral movement. During specific movements biases were small to moderate only for acceleration and deceleration peaks and large for peak speed. During the sprint, standardised biases were extremely large for peak deceleration and moderate for peak speed and acceleration. Standardised TEEs were small to moderate for all variables for lateral and specific movements and for peak speed during sprints. They were very large for peak acceleration and deceleration during

sprints. In the same way, the magnitude of the correlations was almost perfect for all variables during lateral and specific movements and for peak speed in sprints. The correlation was only small for acceleration and deceleration during sprint.

DISCUSSION

The purpose of this study was to assess the concurrent validity of the Kinexon LPS UWB based system in comparison to the Vicon motion capture system during sprints, lateral movements, and handball-specific drills. The present results suggest that the LPS Kinexon validity may be considered as acceptable to assess indoor locomotor movements. The magnitude of the correlations between the two systems was almost perfect (> 0.90) for all variables during all types of movements, except in three particular cases: i) peak decelerations during specific movements in the centre of the field, ii) peak accelerations during linear sprints on the side of the field and iii) peak decelerations during linear sprints on the side of the field.

As shown in Table 1, in the centre of the playing field, the standardised TEEs of peak speed and peak acceleration for sprints, lateral and specific drills were trivial to moderate (CV 0.3 ± 0.1 to $2.8 \pm 0.9\%$). These results were similar to or even better than both those reported by Serpiello et al. (2017) for LPS (CV < 3.5%) and Scott et al. (2016) for GPS (peak speed CV: 5.4 to 20.6%). Regarding

peak deceleration in both linear sprints and lateral movements, standardised TEEs were also small to moderate (1.5 ± 0.4 and $2.0 \pm 0.5\%$). Those results were better than those obtained by Serpiello *et al.* (2017) ($CV > 10\%$). For peak deceleration during specific movements, however, the standardised TEE was very large ($5.0 \pm 1.6\%$). There were also almost perfect correlations of the data between the two systems ($r > 0.9$) during both multidirectional (specific movements) and unidirectional movements (sprints and lateral movements), except for peak decelerations during specific movements ($r: 0.61 \pm 0.26$). In comparison with the results obtained in the various GPS or LPS validity studies [5, 7, 9], the Kinexon system seems to be more effective for measuring peak speed, accelerations and decelerations during handball-specific movements. It also seems more effective at measuring high acceleration and deceleration peaks during sprints performed in the centre of the playing field ($CV < 5\%$) than the other positioning system already tested ($CV > 5\%$) [7, 18].

As shown in Table 2, on the side of the playing field, peak speed standardised TEEs were small to moderate regardless of the type of movement (0.7 ± 0.2 to $2.1 \pm 0.6\%$); in contrast however, standardised TEEs for peak accelerations and decelerations were small to moderate for lateral and handball-specific movements (1.9 ± 0.5 to $5.5 \pm 0.7\%$). During the sprint, extremely large standardised TEEs could be found for peak accelerations and decelerations (5.4 ± 2.6 to $9.4 \pm 2.6\%$). The large TEE reported and the measurements errors of the Kinexon system on the side of the playing field mirrored the poor correlations observed in terms of peak accelerations and decelerations during linear sprint ($r: 0.36 \pm 0.30$ and 0.25 ± 0.33). This measurement error may be due to the method used to obtain the acceleration signal, which was derived twice from the position signal. However, deriving the signal likely multiplies the possible measurement errors. For this reason, even if speed measurement was very precise ($r: 0.97 \pm 0.02$, standardised TEE: 0.26 ± 0.09), it still contained some errors that were likely increased by the derivation process. This problem did not occur in the centre of the playing field since the agreement was almost perfect for sprinting speed ($r: 1.00 \pm 0.00$, standardised TEE: 0.06 ± 0.02); the measurement error was too small to affect the correlation after derivation. Moreover, the standardised bias was greater on the side of the field (0.84 ± 0.08) than in the centre of the field (0.38 ± 0.03). These results were similar to or even better than those presented by Luteberget *et al.* [8] when examining the ClearSky system on the side of the field. The current results demonstrated that when the distance between the receiver tag and the antennas is not homogeneous, the accuracy of acceleration and deceleration measurements decreases. GPS validity studies also showed an overall inability to correctly measure accelerations and decelerations on the side of the playing field in a stadium covered with a roof, but this was more likely here due to a limited number of connected satellites [19].

The Kinexon system seems to be more accurate than GPS, which is generally less reliable for measuring multidirectional movements ($CV > 10\%$) than unidirectional movement ($CV < 5\%$), and for mea-

suring peak acceleration and deceleration in sprints ($CV > 5\%$) [18, 20]. In comparison to the ClearSky system examined by Luteberget *et al.* [8], the Kinexon system is likely more accurate to measure peak speed anywhere on the field ($r: 0.91\text{--}1.00$ versus $0.37\text{--}0.98$ and standardised TEE: $0.06\text{--}0.47$ versus $0.19\text{--}2.54$). Everywhere on the field, Kinexon measurement of peak speed and acceleration is likely as effective as the LPS system examined by Serpiello *et al.* [7], and better for measuring peak decelerations. Moreover, our results demonstrated that changes of direction, including handball-specific movements, were correctly detected and measured by the Kinexon system for all variables in all conditions in comparison to Vicon ($CV: 0.3\text{--}2.8\%$), with the exception of peak deceleration in the centre of the field ($CV: 5.0\%$). These results were better than those observed by Serpiello *et al.* [7] for LPS ($CV: 2.1\text{--}5.3\%$) and by Vickery *et al.* (2014) for GPS ($CV: 20.0\%$) during successive 45° and 90° change of direction and random movements including change of direction.

Limitations

The results of the present study reflect the specific configuration of the UWB-based LPS Kinexon in our indoor stadium (i.e., Coubertin Indoor Stadium, Paris). In fact, the effect of the position of the antennas in the stadium is important, particularly when distances between the field of play and the walls are small. It seems that when the heterogeneity in the distance between the receiver tag and some of the antennas is too great (i.e., very close to the tag for some antennas, very far for others), the quality of peak acceleration and deceleration measurement is impaired.

This study did not investigate the validity of the Kinexon system near the penalty spot even though some players spend more time near this position than anywhere else on the playing field. However, for medio-lateral side-to-side and specific movement, our results did not show a significant difference between the centre and the side of the playing field. In consequence, it could be assumed that the validity would have been similar in this specific spot in comparison to the one calculated for the two tested areas.

Practical applications

This study demonstrated that 20 Hz LPS Kinexon units can measure the fundamental handball movement demands in terms of peak speed, peak acceleration and peak deceleration with an acceptable level of error, especially in the centre of the field. Practitioners may however need to treat some of the data with more care, such as peak accelerations and decelerations of wing players, which were shown to have a lower level of precision.

CONCLUSIONS

To conclude, the UWB-based Kinexon system has an acceptable validity compared with the Vicon to assess handball-specific locomotor patterns. Care should however be taken when monitoring accelerations and decelerations on the side of the playing field during linear sprints (e.g., wingers' counterstrike).

REFERENCES

- Buchheit M, Allen A, Poon TK, Modonutti M, Gregson W, Di Salvo V. Integrating different tracking systems in football: multiple camera semi-automatic system, local position measurement and GPS technologies. *J Sports Sci.* 2014;32(20):1844-57.
- Carling C. Interpreting physical performance in professional soccer match-play: should we be more pragmatic in our approach? *Sports Med.* 2013;43(8):655-63.
- Larsson P. Global Positioning System and Sport-Specific Testing. *Sports Med.* 2003;33(15):1093-101.
- Schutz Y, Chambaz A. Could a satellite-based navigation system (GPS) be used to assess the physical activity of individuals on earth? *Eur J Clin Nutr.* 1997;51(5):338-9.
- Scott MTU, Scott TJ, Kelly VG. The Validity and Reliability of Global Positioning Systems in Team Sport: A Brief Review. *J Strength Cond Res.* 2016;30(5):1470-90.
- Alarifi A, Al-Salman A, Alsaleh M, Alnafessah A, Al-Hadhrami S, Al-Ammar MA, et al. Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances. *Sensors (Basel).* 2016;16(5).
- Serpiello FR, Hopkins WG, Barnes S, Tavrou J, Duthie GM, Aughey RJ, et al. Validity of an ultra-wideband local positioning system to measure locomotion in indoor sports. *J Sports Sci.* 2017;1-7.
- Luteberget LS, Spencer M, Gilgjen M. Validity of the Catapult ClearSky T6 Local Positioning System for Team Sports Specific Drills, in Indoor Conditions. *Front Physiol.* 2018;9:115.
- Hoppe MW, Baumgart C, Polglaze T, Freiwald J. Validity and reliability of GPS and LPS for measuring distances covered and sprint mechanical properties in team sports. *PLoS One.* 2018;13(2):e0192708.
- Aughey RJ. Application of GPS Technologies to field Sports. *Int J Sports Physiol Perform.* 2011.
- Cloe Cummins RO, Helen O'Connor, Cameron West. Global Positioning Systems (GPS) and Microtechnology Sensors in Team Sports: A Systematic Review. *Sports Med.* 2013.
- Varley MC, Fairweather IH, Aughey RJ. Validity and reliability of GPS for measuring instantaneous velocity during acceleration, deceleration, and constant motion. *J Sports Sci.* 2012;30(2):121-7.
- Ryu Nagahara AB, Enrico Rejc, Masaaki Koido, Takeshi Shimizu, Pierre Samozino, and Jean-Benoit Morin. Concurrent Validity of GPS for Deriving Mechanical Properties of Sprint Acceleration. *Int J Sports Physiol Perform.* 2016.
- Kinexon. Real-time athlete tracking—Precise. Simple. Smart. In: Munich, editor. Kinexon Precision Technologies 2016.
- Buchheit M, Simpson BM. Player-Tracking Technology: Half-Full or Half-Empty Glass? *Int J Sports Physiol Perform.* 2017;12(Suppl 2):S235-S41.
- Malone JJ, Lovell R, Varley MC, Coutts AJ. Unpacking the Black Box: Applications and Considerations for Using GPS Devices in Sport. *Int J Sports Physiol Perform.* 2017;12(Suppl 2):S218-S26.
- Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, Hanin J. Progressive Statistics for Studies in Sports Medicine and Exercise Science. *Med Sci Sports Exerc.* 2009;41(1):3-12.
- Vickery WM, Dascombe BJ, Baker JD, Higham DG, Spratford WA, Duffield R. Accuracy and Reliability of GPS Devices for Measurement of Sports-Specific Movement Patterns Related to Cricket, Tennis, and Field-Based Team Sports. *J Strength Cond Res.* 2014;28(6):1697-705.
- Williams M, Morgan S. Horizontal positioning error derived from stationary GPS units: A function of time and proximity to building infrastructure. *Int J Perform Anal Sport.* 2017;9(2):275-80.
- Waldron M, Worsfold P, Twist C, Lamb K. Concurrent validity and test-retest reliability of a global positioning system (GPS) and timing gates to assess sprint performance variables. *J Sports Sci.* 2011;29(15):1613-9.

ÉTUDE 2 : INTENSITÉ LOCOMOTRICE MAXIMALE CHEZ LES JOUEURS DE HANDBALL D'ÉLITE : UN PREMIER APERÇU DES DIFFÉRENCES DE POSTES DE JEU ET DES PRATIQUES D'ENTRAINEMENT

PEAK LOCOMOTOR INTENSITY IN ELITE HANDBALL MATCHES: EFFECT OF PLAYERS POSITIONS AND TRAINING PRACTICE

Publication associée :

Antoine Fleureau, Giuseppe Rabita, Cédric Leduc, Martin Buchheit, and Mathieu Lacomme (2022). "Peak locomotor intensity in elite Handball matches: effect of players positions and training practice." *Journal of Strength and Conditioning Research*.

Communication associée :

Antoine Fleureau, Giuseppe Rabita, Cédric Leduc, Martin Buchheit, and Mathieu Lacomme (2020). "Peak locomotor intensity in elite Handball matches: effect of players positions and training practice." Abstr-ID: 638, Presentation format: Mini-Oral, Session name: CP-AP03 - Training and testing II - Cross - sectional **26th Virtual Congress of the European College of Sport Science**

Objectif de l'étude

Nous avons pu montrer lors de notre revue de littérature qu'il est logiquement nécessaire de bien caractériser l'activité des joueurs en compétition afin de permettre aux entraîneurs et préparateurs physiques de mieux y préparer les joueurs. Or dans le cadre du Handball, bien qu'un certain nombre d'études se soient interrogées sur le volume d'activité des joueurs lors des compétitions, aucune n'a à ce jour permis de caractériser les intensités maximales déployées par ces derniers. Les quelques études dont nous avons pu prendre connaissance qui ont cherché à caractériser l'intensité de l'activité Handball en sont resté à une description générale ne permettant absolument pas de se rendre compte de la variation de l'intensité au cours du match. C'est pourquoi nous chercherons ici à déterminer les intensités maximales déployées durant les matchs par les joueurs en fonction de leurs postes (i.e. arrières, ailiers pivots). Par ailleurs, puisque l'objectif d'une telle étude est de permettre aux entraîneurs et préparateurs physique d'ajuster leur pratique, il nous semble important de nous intéresser également à l'intensité déployée par les joueurs durant les situations les plus classiques d'entraînement, afin de pouvoir aiguiller l'encadrement sur l'optimisation de leurs pratiques. L'objectif sera alors de comparer les intensités atteintes lors des situations classiques d'entraînement avec celle produites en compétition. Ainsi nous nous appuierons sur deux hypothèses de travail. La première concernant l'évolution de l'intensité en compétition dont nous supposons une décroissance au cours du temps, suivant une loi de puissance. En effet, les études similaires ayant été effectuées dans d'autres sports tels que le Football et le Rugby ont pu montrer un tel comportement. Au regard de la littérature scientifique sur le sujet, notamment dans ces deux sports, nous nous appuierons sur une seconde hypothèse pour notre objectif secondaire. Celle-ci sera que les situations classiques d'entraînement sont en mesures de reproduire les intensités de compétitions.

Méthodologie

Approche expérimentale du problème

Afin de caractériser l'activité locomotrice maximale durant les matchs et les SSGs au niveau élite en Handball, nous nous sommes appuyés sur une analyse rétrospective des données collectées durant deux saisons consécutives (2018-2019 et 2019-2020). Toutes les données

relatives aux matchs ont été collectées lors de compétitions officielles (Lidl Starligue [1^{ère} division française], n=19 matchs et Ligue des champions européenne, n=18 matchs) pour un total de 121 observations joueur-match. L'ensemble des matchs à notre disposition a été étudié. En effet, notre système de suivi de l'activité des joueurs étant installé à demeure sur le site du club, il nous était impossible de récupérer les données des matchs effectués en déplacement. De plus, la seconde saison ayant été limitée au début du mois de mars en raison de la pandémie, cela a réduit le nombre de matchs à notre disposition. Nous avons décidé de ne conserver que les données des joueurs ayant un temps de jeu effectif minimum de 30 min afin de limiter l'impact d'un temps de jeu effectif réduit qui pourrait impliquer une intensité de jeu plus importante. En ce qui concerne les SSGs, les données ont été collectées en cours de saison lors de sessions d'entraînement classique, dans le même gymnase que celui où les matchs étaient joués, pour un total de 342 observations joueurs-SSGs. Les trois formats de SSGs sélectionnés pour la présente analyse l'ont été parce qu'ils étaient très régulièrement utilisés par l'équipe d'entraîneurs et sont donc représentatif des sessions d'entraînements d'une équipe de niveau élite. Par ailleurs, l'analyse de ces SSGs est à même de fournir des informations pour la programmation des entraînements professionnels de Handball. Les SSGs choisis sont les suivants 1) 4v4 joué sur une surface trapézoïdale d'approximativement 12 x 12 m + 1 gardien de but (GK), 2) 6v6 joué sur un demi-terrain (6v6HF) + 1GK, 20 × 20 m, demi-terrain complet et 3) 6v6 joué sur l'ensemble du terrain (6v6FF) + 2GKs, 40 × 20 m, tout terrain. Les détails de chaque SSGs sont fournis dans le tableau 1 de cet article (cf. Tableau 8). Nous avons également inclus l'analyse d'exercices de courses intermittentes à haute intensité (HIIT) afin de se rendre compte des capacités physiques réelles des joueurs en termes d'intensité déployée, et de les mettre en relation avec leur activité en match et en entraînement. Ces données de HIIT ont été collectées durant la seule période de la saison permettant de tels exercices, à savoir la présaison, lors des deux saisons étudiées. Ainsi, bien que n'étant représentative que d'un moment particulier de la saison, il nous semble intéressant de s'y attarder car ces données sont représentatives des intensités maximales que les joueurs sont en mesure de développer.

Participants

Le fait de ne conserver que les données des joueurs ayant un temps de jeu effectif minimum de 30 minutes nous a amené à ne conserver les données que de 11 joueurs professionnels (25±7 ans, 191±8 cm, 89±12 kg). Ces derniers font partie de l'effectif d'une équipe française de

Handball de 1^{ère} division et ont été regroupés en fonction de leur poste de jeu (ailiers [n=4], pivots [n=3], arrière [n=4]). Ces données sont issues du suivi quotidien des joueurs, dans le cadre duquel les activités des joueurs ont été systématiquement mesurées, à domicile, au cours de chaque session d'entraînement et de match au cours des deux saisons. L'analyse s'est réduite à 11 joueurs car ces derniers n'étant pas obligés de porter le système en compétition, nous ne pouvions pas nous appuyer sur l'ensemble de l'effectif professionnel. Cette problématique a diminué au fur et à mesure des saisons grâce à de nombreuses discussions individuelles pour leur faire comprendre l'intérêt pour eux et pour l'encadrement de disposer de leurs données de compétition. Ainsi lors de la dernière saison, seul un joueur de champs et un gardien restaient réticents à l'utilisation de l'outil en compétition. Malheureusement nous avons dû conduire notre étude avant cette troisième saison, de ce fait nous avons dû nous contenter de ces 11 joueurs.

Protocole expérimental

Pour les matchs et les SSGs, l'activité des joueurs a été enregistrée à l'aide du LPS Kinexon™ que nous avons étudié lors de notre première étude. Cet outil s'appuie sur un système de positionnement et un dispositif accélérométrique embarqué enregistrant les données à des fréquences respectives de 20 Hz et 100 Hz (Kinexon™, Kinexon GMBH, Munich, Allemagne). Pour rappel, il se compose de 14 antennes, positionnées autour du terrain de Handball à trois hauteurs différentes, et de balises (incluant les différents capteurs) portées par les joueurs au centre du haut du dos, à l'aide d'une brassière fournie par le fabricant. Les données ont été traitées par le logiciel spécifique Kinexon™ pour obtenir la TD (m) et la DHV (m, distance parcourue à une vitesse supérieure à 14,5 km·h⁻¹). Le choix de ces variables provient de notre première étude concernant la validité du dispositif Kinexon™ LPS qui nous a permis d'établir, en comparaison à un outil de capture du mouvement en 3 dimensions (Vicon®), une validité acceptable pour la mesure de la distance parcourue et la vitesse maximale atteinte lors de sprints, et de mouvements latéraux et spécifiques au Handball. N'ayant pu valider les mesures d'accélération et de décélération maximales de ce LPS, nous ne pouvons pas nous appuyer sur ces données pour quantifier l'activité des joueurs de Handball en situation de compétition et d'entraînement.

Traitement des données

Variables

Mis à part les données de TD et de DHV, directement obtenu à partir du système Kinexon™, nous avons calculé l'AR (a.u) à partir des données inertielles brutes (100Hz) comme une mesure globale de la CE puisqu'elle est une représentation de la quantité de mouvement effectuée par les joueurs. Pour rappel, l'AR ce calcul comme suit :

$$Accel'Rate^{\text{TM}} = \left| \sqrt{(a_{x_i})^2 + (a_{y_i})^2 + (a_{z_i})^2} - \sqrt{(a_{x_{i-1}})^2 + (a_{y_{i-1}})^2 + (a_{z_{i-1}})^2} \right|$$

Le paramètre ax est l'accélération médio latérale, ay est l'accélération antéropostérieure et az est l'accélération verticale, tandis que les indices i et $i - 1$ représentent respectivement des mesures instantanées consécutives. Les mesures accélérométriques ont été traitées avec un script personnalisé dans R Studio (Version R-4.0.2, R Foundation for Statistical Computing). Pour plus de lisibilité, la valeur finale obtenue a été divisée par 100. Pour rappel, nous privilégions cette variable au classique PlayerLoad car le calcul de ce dernier présente des limites importantes pour être utilisé comme substitut de l'estimation de la CE du corps entier (cf. 4.2.2 Mesures accélérométriques).

Modélisation de la loi de puissance

Dans le but d'être en mesure de comparer les données de joueurs ayant des temps de jeu effectif, différents, que ce soit en match ou en entraînement, toutes les données ont d'abord été rapportées par minutes (c'est-à-dire $m \cdot \text{min}^{-1}$ et a.u). À la suite de cela, nous nous sommes appuyés sur la méthodologie employée par Delaney et al. (2015) dans le rugby et reprise par Lacomme et al. (2018) en Football. Ainsi, les intensités locomotrices maximales ont été calculées pour différentes périodes à l'aide de moyenne mobile (0,5 ; 1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; 9 ; 10 et 15 min). Une fois obtenues les intensités maximales spécifique à chaque variable et chaque poste, pour chacune de ces durées il a alors été possible de modéliser la décroissance de l'intensité au cours du temps, pour l'ensemble des conditions. Pour cela, nous avons utilisé un modèle de loi de puissance auquel nous avons soumis nos observations individuelles. Les modélisations ainsi construites, à partir des données mesurées, permettent alors d'extrapoler les intensités maximales théoriques qu'il est possible de récupérer à l'aide d'une simple régression

logarithmique. En effet, effectuer ce type de régression permet de transformer une courbe suivant une loi de puissance en une droite, dont l'ordonnée à l'origine (i.e. intercept) correspond à l'intensité maximale théorique pour une minute de temps de jeu, par définition du logarithme puisque $\log(1) = 0$. Le coefficient directeur (i.e. pente) de cette droite correspond alors au taux de décroissance de l'intensité déployée au cours du temps. Nous avons alors utilisé ces valeurs de pente et d'intercept pour comparer les intensités déployées par les joueurs en fonction de leur poste, mais également comparer les résultats obtenus en compétition avec ceux issus des SSGs classiques d'entraînement.

Analyse statistique

Préalablement à toute analyse statistique nous avons tenu à nous assurer que nos données suivaient bien une distribution normale afin de définir le type d'analyse pouvant être effectué. De ce fait, nous avons utilisé le test de normalité de Kolmogorov-Smirnov pour chaque variable incluse dans l'analyse. Pour chacune des variables, les données rétro transformées ont été utilisées pour les statistiques descriptives (moyenne \pm écart-type). Avant toute analyse de nos données en termes d'activité produite par les joueurs, nous avons tenu à vérifier dans quelle mesure nos données correspondaient à nos modèles de loi de puissance. Pour cela nous avons calculé des coefficients de corrélations entre nos données et nos modèles. Ainsi nous avons définis que ces coefficients de corrélations étaient presque parfaits pour des valeurs $> 0,95$ et acceptables pour des valeurs $> 0,90$. Toute valeur inférieure à $0,90$ serait considérée pour notre analyse comme une absence de corrélation. Notre premier niveau d'analyse de l'activité des joueurs avait pour but d'examiner l'intensité locomotrice maximale globale pour les différentes variables (TD, DHV et AR) et à évaluer les différences potentielles entre les positions pendant les matchs de compétition. Pour cela les pentes et les intercepts de chaque variable locomotrice ont été comparés à l'aide d'un modèle linéaire mixte où les positions des joueurs étaient traitées comme un effet fixe, tandis que les joueurs étaient considérés comme un facteur aléatoire. Une méthodologie similaire a été employée pour étudier les différences entre les matchs et les SSGs, pour chaque variable. Dans ce cas l'événement (matchs ou SSGs) a été considéré comme fixe, tandis que les joueurs ont été considérés comme un facteur aléatoire. Le fait de considérer les joueurs comme des facteurs aléatoires, dans les différents modèles mixtes linéaires, permet de supprimer statistiquement l'impact du temps de jeu effectif individuel des joueurs sur les résultats. Afin de construire ces modèles d'analyse nous avons utilisé le logiciel statistique R

(R. 3.1.0, R Foundation for Statistical Computing) et en particulier le paquet lme4 qui permet de générer ces modèles linéaires mixtes en spécifiant les effets fixes et les facteurs aléatoires. Chaque modèle a ensuite été étudié de manière approfondie avec des différences standardisées (ES), sur la base du principe de la taille de l'effet de Cohen. La standardisation a été effectuée à l'aide des moyennes marginales estimées et de la variance associée fournies par le modèle linéaire généralisé. Les valeurs seuils pour les différences standardisées étaient les suivantes : triviales < 0,2 ; petites < 0,6 ; modérées < 1,2 ; grandes < 2 et très grandes > 2, comme décrit par Hopkins. Les probabilités ont été utilisées pour faire une inférence probabiliste qualitative sur la réalité des différences observées. Celles-ci ont été évaluées par rapport au plus petit changement valable ($0,2 \times$ les écarts-types regroupés). L'échelle était la suivante : 25-75 %, possible ; 75-95 %, probable ; 95-99 %, très probable ; > 99 %, presque certain.

Résultats

Le premier résultat que nous devons souligner est la validation du fait que la décroissance de l'intensité déployée par les joueurs au cours du temps suit bien une loi de puissance. En effet, le calcul des coefficients de corrélation entre les modèles de loi de puissance que nous avons construits et nos données ont été, pour l'ensemble des conditions, supérieur à 0,95, hormis dans le cas des HIIT pour lesquels nous avons des corrélations inférieures à 0,85 (cf. Tableau 7).

Session	Ailiers			Arrières			Pivots		
	DT	DHV	AR	DT	DHV	AR	DT	DHV	AR
4v4	0,97	0,99	0,97	0,97	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99
6v6HF	0,99	0,99	0,98	0,98	0,99	0,97	0,99	0,99	0,98
6v6FF	0,97	0,99	0,96	0,97	0,99	0,98	0,98	0,99	0,96
Matchs	0,96	0,98	0,96	0,97	0,99	0,96	0,96	0,99	0,98
HIIT	0,72	0,83	0,44	0,66	0,81	0,75	0,76	0,85	0,81

Tableau 7 : Coefficients de Corrélation entre les données réelles et les modèles de loi de puissance.

Le principal résultat de l'analyse de l'intensité déployée par les joueurs en matchs est la spécificité du poste d'ailier (cf. Figure 30). En effet, les joueurs à ce poste présentent la plus haute intensité maximale théorique pour toutes les variables (TD : $156 \pm 13 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$; DHV : $96 \pm 12 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$; AR : $13 \pm 3 \text{ u.a}$), et ce de manière significative (cf. Tableau 9).

Concernant la comparaison des intensités déployées en match et en entraînement, le principal résultat à faire remonter est l'absence de reproduction des intensités de compétition durant les entraînements, quels que soient les postes, les variables et la durée du SSGs (cf. Tableau 10).

Ainsi, pour la TD nous avons des différences standardisées entre les matchs et le 6v6FF de $1,74 \pm 0,20$; de $3,56 \pm 0,22$ pour le 6v6HF et de $3,68 \pm 0,21$ pour le 4v4. Pour la DHV nous avons des résultats similaires avec des différences standardisées de $1,33 \pm 0,19$ par rapport au 6v6FF ; $4,21 \pm 0,27$ avec le 6v6HF et $5,94 \pm 0,30$ avec le 6v6HF. Enfin nous avons des différences standardisées de $1,33 \pm 0,19$ en 6v6FF ; $3,31 \pm 0,21$ en 6v6HF et $3,25 \pm 0,20$ en 4v4 pour l'AR.

Discussion

À la lecture de la littérature scientifique, il nous est difficile de comparer nos résultats avec ceux d'études ayant porté sur le Handball. En effet, nous nous sommes interrogés sur les intensités maximales produites par les joueurs en compétition et en entraînement et aucune étude auparavant n'avait proposé d'analyse à ce sujet. Néanmoins il nous est possible d'analyser nos résultats en relation avec les informations existantes sur l'activité Handball, à la fois en termes de volume et d'intensité globale. Il est également possible de considérer nos résultats au regard des connaissances existantes sur d'autres sports collectifs intermittent tel que le Rugby et le Football. Ainsi, concernant le fait que l'évolution de l'intensité déployée au cours du temps suive une loi de puissance (cf. Tableau 7), cela est cohérent avec les travaux de Delaney et al. (2015) en Rugby et avec ceux de Lacome et al. (2018) en Football. Le fait que nous ayons pu montrer la spécificité du poste d'ailier en termes d'intensité de jeu (cf. Tableau 9) est contradictoire avec les études de Karcher et al. (2014), Luteberget et al. (2017) ou encore Póvoas et al. (2014). En effet lors de ces études précédentes, les joueurs de la base arrière étaient ceux présentant la TD et la charge mécanique (i.e. PlayerLoad™) les plus élevés (cf. 3.3 Distribution du volume de l'activité). Cette différence n'est pas surprenante puisque ces études antérieures se sont intéressées à l'intensité moyenne et au volume d'activité global, alors que la présente étude s'intéresse à l'intensité maximale. Ceci, souligne encore l'importance de la méthode employée lors de l'analyse des exigences de match (cf. 3.6 Pics d'intensité). D'ailleurs, lorsque l'on compare l'intensité déployée relative à la DT, sur des fenêtres de 15 minutes, nos résultats actuels étaient similaires à ceux rapportés par Póvoas pour la durée totale du match (81 ± 7 vs. 82 ± 15 m-min⁻¹). Néanmoins, lorsque l'on compare l'intensité locomotrice maximale (127 à 156 m-min⁻¹), le TD a été 1,7 à 2,4 fois plus élevé que celui rapporté dans les études précédentes. La différence ainsi mise en évidence nous semble parfaitement logique puisque l'intensité maximale mesurée est directement dépendante de la longueur de la fenêtre

de la moyenne mobile, comme l'on démontré Delaney et al. (2017). Par conséquent, les praticiens pourraient avoir besoin de prendre en compte ces durées d'analyse plus courtes afin de proposer un programme d'entraînement correspondant à l'activité locomotrice réelle des joueurs durant les matchs. Malgré la différence de méthodes utilisées (i.e. intensité de l'activité versus volume d'activité), nos résultats font écho à ceux des études précédentes concernant les DHV. En effet, dans les deux types d'analyse les ailiers présentent le plus haut niveau de DHV en comparaison avec les autres postes. Cela met en évidence le niveau élevé de spécificité de ces joueurs, et donc la nécessité d'individualiser les entraînements pour eux, notamment par l'utilisation de séquences de courses de haute intensité supplémentaires. Il est d'ailleurs intéressant de noter qu'aucune différence significative n'a été mesurée entre les postes sur les exercices de HIIT (ES DT : 0,01 — 0,43 ; DHV : 0,04 — 0,26 ; AR : 0,18 — 1,03). Cela induit donc un paradoxe au regard de nos résultats, puisque cela implique une préparation non adaptée au poste, avec soit une sur-préparation des arrières et des pivots (le plus probable) soit une sous-préparation des ailiers (le moins probable puisque les ailiers performant en compétition). D'autre part, concernant les pics d'intensité mesurés en match, il convient de mentionner que malgré la grande spécificité des actions locomotrices de chaque position, une intensité similaire dans les charges mécaniques a été observée pour les pivots et les arrières. En effet, les pivots ont notamment pour objectif le maintien d'une position dans la défense adverse tandis que les arrières multiplient les accélérations et les décélérations pour créer du mouvement dans la défense adverse. Bien que la méthode de calcul soit différente de celle des études précédentes utilisant le PlayerLoad™, il n'est pas surprenant de trouver des résultats similaires entre les pivots et les arrières en ce qui concerne la DT (127 ± 10 vs 136 ± 13 respectivement) et la charge mécanique (11 ± 2 vs 11 ± 2 respectivement) en raison des corrélations multiples entre ces deux variables. Cependant, les joueurs de la base arrière répètent davantage d'événements de haute intensité pour forcer les adversaires à se déplacer, tandis que les pivots effectuent des courses suivies d'efforts isométriques pour maintenir leur position dans la défense de l'adversaire. De plus, ces joueurs n'avaient pas la même activité en défense, puisque certains se retrouvent principalement à défendre en poste 2 (arrière) tandis que d'autres sont généralement en poste 3 (pivot). Ces différences de position impliquent des rôles différents et donc une activité différente. En effet, les numéros 3 de défense, en étant au centre du dispositif, doivent effectuer beaucoup plus d'action pour bloquer les attaquants adverses, et doivent également organiser la défense et gérer le pivot adverse la majorité du temps. Par conséquent, cela souligne

l'importance de combiner le LPS avec les données de l'accéléromètre car ils fournissent tous deux des informations différentes sur l'activité locomotrice des joueurs.

Concernant la comparaison entre les intensités de match et celles des situations classiques d'entraînement, nos résultats sont contraires à ce qu'il a pu être démontré dans d'autres sports. En effet Lacombe et al. (2018) ont mis en évidence, au Football, la capacité des SSGs, organisé en 10v10 sur tout terrain, de reproduire voire de surpasser les intensités de compétition. Toutefois cette étude s'appuie sur une majorité de matchs amicaux tandis que notre étude ne prend en compte que des matchs officiels, dont certains à élimination comme les huitièmes et quart de final de la Champion's League. Cela peut logiquement induire des intensités de jeu supérieures à celle pouvant être engagées sur des matchs amicaux. De plus, l'enchaînement des rencontres en Handball (un match tous les 3-4 jours en moyenne sur 30 semaines) limite les opportunités pour les entraîneurs d'organiser des sessions d'entraînements pendant lesquels des intensités similaires à celle des matchs serait recherché. Par conséquent, la majorité des entraînements, et donc des SSGs, sont organisés à des fins technico-tactique, ce qui peut également expliquer nos résultats. Néanmoins, puisqu'il arrive parfois de n'avoir qu'un seul match dans la semaine, nous nous devons de recommander aux praticiens l'utilisation d'exercices de cours isolé tel que des HIIT afin de reproduire ces intensités de compétitions lorsque le calendrier le permet.

Limites

Bien que cette étude présente des informations nouvelles permettant de mieux caractériser l'activités des joueurs de Handball en compétition et sur la capacité des situations d'entraînement classique à reproduire les exigences des matchs, il convient de mentionner plusieurs limites à notre travail. Premièrement, en raison du faible nombre de sujets étudiés, nos résultats peuvent n'être représentatifs que des profils des joueurs. De même, n'ayant pu travailler que sur une seule équipe et un unique entraîneur, nos résultats peuvent n'être représentatifs que du style d'entraînement mis en place. En effet, des résultats différents auraient potentiellement pu être observés avec d'autres équipes utilisant des systèmes tactiques différents pouvant influencer directement l'intensité locomotrice maximale. Par conséquent, il convient de faire preuve de prudence lors de la généralisation de ces résultats à d'autres contextes. Par ailleurs, seuls trois types de SSGs ont été étudiés. Il est probable que d'autres formats de jeu,

notamment les dimensions du terrain utilisé, le nombre de joueurs, les règles, l'inclusion ou non de contacts, pourraient conduire à des résultats différents et nécessitent des investigations supplémentaires. Nous relevons également la problématique de n'avoir pu considérer que les entraînements et les matchs effectués à domicile sur une saison et demie uniquement. Il est possible que les résultats auraient été différents avec une plus longue période analysée.

Conclusion

Nous pouvons donc valider notre première hypothèse de travail concernant la décroissance de l'intensité déployée par les joueurs au cours du temps qui suit bien une loi de puissance. Nous pouvons également conclure que des différences importantes existent entre les positions (i.e. arrière, pivots et ailiers) et ce quelles que soient les variables étudiées (i.e. TD, HS, AR) dans l'intensité déployée. Les ailiers présentent sont les joueurs auquel il est nécessaire d'accorder une attention particulière puisqu'il s'agit de ceux présentant, toujours, la plus haute intensité d'activité au cours des matchs. Toutefois, concernant notre seconde hypothèse de travail, relative à la capacité des situations entraînement de reproduire les intensités de match, nous devons la réfutée. En effet, quels que soient les formats de SSGs analysé dans cette étude, aucun de ceux-ci n'est en mesure de reproduire les exigences de la compétition pour toutes les variables étudiées, et ce indépendamment de leur durée. Ces nouvelles informations sont donc primordiales pour individualiser la préparation physique des joueurs, notamment celle des ailiers, et améliorer la gestion globale de la charge d'entraînement des handballeurs d'élite, en particulier en ce qui concerne les SSGs classiquement utilisés. Nous noterons tout de même l'importance pour des études ultérieures d'intégrer les contacts dans l'analyse de l'intensité locomotrice maximale.

Applications pratiques

Au regard de nos résultats nous pouvons distinguer deux principales applications pratiques. La première concerne la préparation physique des ailiers qui doit nécessairement prendre en compte les spécificités de ce poste en particulier concernant la course à haute intensité qui semble être spécifique à ce poste. Par ailleurs, puisque qu'aucun des SSGs étudiées ici ne semble être en mesure de reproduire les exigences de la compétition, les praticiens doivent pouvoir envisager parfois l'utilisation d'exercices de course isolés (par exemple, intervalles courts ou sprint répété).

Peak Locomotor Intensity in Elite Handball Players: A First Insight Into Player Position Differences and Training Practices

Antoine Fleureau,^{1,2} Giuseppe Rabita,² Cédric Leduc,^{1,3} Martin Buchheit,^{2,4,5,6} and Mathieu Lacomme^{1,2}

¹Performance Department, Paris Saint Germain, Saint-Germain-En-Laye, France; ²Research Department, Laboratory Sport, Expertise and Performance (EA 7370), French Institute of Sport (INSEP), Paris, France; ³Carnegie Applied Rugby Research (CARR) Centre, Carnegie School of Sport, Leeds Beckett University, Leeds, United Kingdom; ⁴HITSscience, Revelstoke, British Columbia, Canada; ⁵Institute for Health and Sport, Victoria University, Melbourne, VIC, Australia; and ⁶Kitman Labs, Performance Research Intelligence Initiative, Dublin, Ireland

Abstract

Fleureau, A, Rabita, G, Leduc, C, Buchheit, M, and Lacomme, M. Peak locomotor intensity in elite handball players: a first insight into player position differences and training practices. *J Strength Cond Res* XX(X): 000–000, 2022—The aims of the study were to (a) describe the peak locomotor intensity sustained during handball matches and (b) compare them with small-sided games (SSGs) programmed during training in elite handball players. Small-sided game (n = 342) and match (n = 121) data were collected among 11 players (25.6 ± 0.7 years, 191.6 ± 0.8 cm, 89.6 ± 0.2 kg) belonging to an elite French Handball team. Players' locomotor activity was recorded using 20-Hz Local Positioning System. Peak total (TD[m]) and high-speed running distance (HS[m]) and mechanical load (Accel'Rate [a.u.]) were calculated during different time periods (1–15 minutes different rolling averages). A plot of log (locomotor variables) against log (time) allowed to obtain a straight line with a slope and an intercept for each variable. Between-position differences during matches and difference between matches and SSGs were assessed with linear mixed model and magnitude-based decisions. Almost certainly higher peak locomotor intensity (intercept) was found in Wingers (TD: 156.6 ± 0.13; HS: 96.6 ± 0.12; Accel'Rate: 13.6 ± 0.3) compared with other playing positions for TD (Back players: 127.6 ± 0.10; Pivots: 136.6 ± 0.13), HS (Back players: 56.6 ± 0.9; Pivots: 57.6 ± 0.11), and Accel'Rate (Back players: 11.6 ± 0.2; Pivots: 11.6 ± 0.2). However, no clear between-position difference was found regarding the slope. Additionally, none of the SSGs format produced an overload in peak locomotor intensity in comparison with matches (TD: 138.6 ± 0.16; HS: 66.6 ± 0.20; Accel'Rate: 12.6 ± 0.2). Because reaching the peak locomotor intensity sustained during match is not possible using SSGs, practitioners should consider using isolated conditioning drills (e.g., short or long intervals, repeated sprints). Moreover, specific attention should be paid for Winger's work supplementation because they present the highest peak locomotor intensity in the team.

Key Words: match demands, team sport, small-sided games, monitoring

Introduction

The recent development and validation of wearable local positioning system (LPS) has opened up a new area in handball players' monitoring (13). Undeniably, the interest for this technology to describe more accurately match and training demands is growing exponentially (40).

Handball is a strenuous contact Olympic team sport that places emphasis on running, jumping, sprinting, and a range of high-intensity upper-body actions over 2 halves of 30 minutes, interspersed by a 10-minute half-time break (5). Previous studies have investigated match demands (e.g., total distance, high-intensity events) through time-motion analyses, over either the entire match or shorter arbitrary time periods (e.g., block of 15 minutes) (27,33,34,39,42). These demands were described both in absolute and relative to minutes played (27,33,34,39,42).

Address correspondence to Mathieu Lacomme, mathlacomme@gmail.com.

Supplemental digital content is available for this article. Direct URL citations appear in the printed text and are provided in the HTML and PDF versions of this article on the journal's Web site (<http://journals.lww.com/nsca-jscr>).

Journal of Strength and Conditioning Research 00(00)1–7

© 2022 National Strength and Conditioning Association

Although those segmental approaches provide meaningful primary information for practitioners, it is likely that such methods underestimate the peak locomotor intensity fluctuations that can occur over short periods (e.g., over 1–5 minutes) (9,14,25,27,30,41,44). Handball being highly intermittent in nature, with lots of interchanges, failure to consider peak activity demands may bias training prescription, which may in turn underprepare athletes to competition (17). Moreover, consideration about the likely between-player (or position) differences in peak activity is also required (27).

One of the main applications of the analysis of peak locomotor intensity demands over shorter periods during matches is their comparison with the intensities reached during specific small-sided games (SSGs) during training. Although the occurrences and intensity of actions is likely time dependent (i.e., the longer the period, the lower the average intensity), the comparison between match and training activity remains difficult (32). Expressing whole-match running performance relative to minutes played is a first step to allow comparisons with training intensities (17), but using rolling averages have been recently suggested to be more appropriate because it allows quantifying the peaks locomotor intensity over shorter periods (9,31,43). Although this

approach has been widely investigated in outdoor team sport (46), little is known in elite handball player. With this method, locomotor intensity vs. time relationship during matches can be modelled using a power law relationship and can then be compared with SSGs activity. Although some training drills have been deemed suitable to develop aerobic fitness (5,23), SSGs prescription has always been driven by technical and tactical content (16). Consequently, the comparison between match peak intensity and what is achieved by players during SSGs would help to optimize training prescription.

Therefore, the purpose of this study was to (a) characterize the match peak locomotor intensity demands in elite handball, with a specific reference to players' positions and (b) compare the peak intensity demands of SSGs with these reached during official matches.

Methods

Experimental Approach to the Problem

A retrospective observational research design was employed to characterize peak locomotor activity during both match and small-sided games. All match data were collected during official competitions (French first division Star League, n = 19 matches and European Champion's League, n = 18 matches) for a total of 121 player-match observations. Only data from players who completed the equivalent or more than one-half of the match were included (34).

Regarding SSGs, data were collected in-season during typical training sessions, in the same facility as the one where matches were played, for a total of 342 player-SSGs observations. The 3 SSGs formats selected for the present analysis were chosen because they were very regularly used by the coaching team and therefore remained those for which the analysis provides the greatest level of information for programming. The chosen SSGs were as follows: (a) 4v4 played on a 12 × 12 m surface 1. 1 Goalkeeper (GK), (b) 6v6 played on half field (6v6HF) 1. 1 GK, 20 × 20 m, half field, and (c) 6v6 played on the full field (6v6FF) 1. 2 GKs, 40 × 20 m, full field. The details of each SSG are provided in Table 1.

To further contextualize the demands of the different SSGs and match play, the locomotor demands of a typical run-based high-intensity interval training (HIIT) drill was examined as a unique example. The running intensity of the runs was based on the velocity ($\text{km}\cdot\text{h}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) achieved at the end of the 30-15 Intermittent

Subjects

AU2

Data were collected among 11 players (25.6 ± 7 years, 191.6 ± 8 cm, 89.6 ± 12 kg) from one French 1 Division handball team during 2 consecutive seasons (2018–2019 and 2019–2020), including official matches and training sessions. Only data from players who played at least 30 minutes during matches were included to limit the effect of possible performance increment according to low playing time (9,31). Moreover, only players who completed the whole duration of a training session were included in the analysis (31). Players were grouped according to their playing position (Wingers [n = 4], Pivots [n = 3], Back players [n = 4]). These data arose from the daily player monitoring in which player activities were routinely measured over the course of each season. Therefore, ethics committee clearance was not required (47). Nevertheless, the study conformed to the recommendations of the Declaration of Helsinki.

Procedures

For both matches and SSGs, players' activity was recorded using a 20-Hz LPS system and 100-Hz embedded accelerometer devices (Kinexon, Kinexon GmbH, Munich, Germany) (13). The Kinexon Ultrawide band (UWB) system consisted of 14 antennas, positioned around the handball playing field at 3 different heights, and tags worn by the players in the center of the upper back, using the manufacturer harness. The signals were transmitted to the antennas using UWB technology in a frequency range of 4.25–7.25 GHz. The field position of the tag was calculated by a proprietary algorithm based on a combination of different methods such as Time Difference of Arrival, Two-Way Ranging, and Angle of Arrival (Kinexon GmbH, Germany). Data were processed by the specific Kinexon software to obtain total (TD, m) and high-speed running distance (HS, distance run at a velocity above $14.5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).

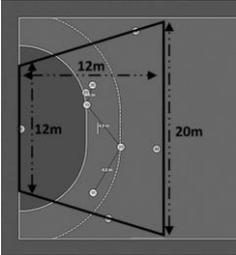
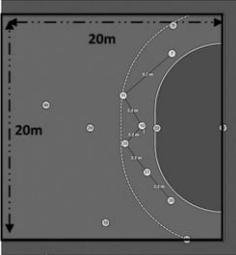
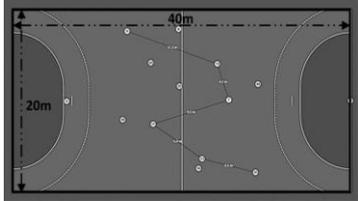
The validity of the Kinexon LPS device have been established and showed small standardized typical error of estimate (from 0.06 to 0.48) compared with 3-dimensional motion capture (Vicon) for sprint, lateral, and specific handball movements (13,20). Additionally, interunit coefficient of variation was reported to range from 2.1 to 9.2% (20).

Data Processing. Additionally, we calculated the Accel'Rate (a.u.) from the raw inertial data (100 Hz) as an overall measure of mechanical load (18). Accel'Rate was calculated as follows:

$$\text{Accel'Rate} = \left| \sqrt{(a_{x_i})^2 + (a_{y_i})^2 + (a_{z_i})^2} - \sqrt{(a_{x_{i-1}})^2 + (a_{y_{i-1}})^2 + (a_{z_{i-1}})^2} \right|,$$

Fitness Test (V_{IFT}) (6). The HIIT drill consisted of 2 sets of 6 minutes, with 2 minutes of rest between sets. Each 6 minutes of exercise consisted of 2 minutes of running, 2 minutes of specific high-intensity movements, and another 2-minute period of running. The 2-minute running sequence was composed of 30-second runs at 100% V_{IFT} , interspersed with 30 seconds of passive recovery, 15-second runs at 110% V_{IFT} , interspersed with 15 seconds of passive recovery, and 5-second runs at 120% V_{IFT} , interspersed with 25 seconds of passive recovery. The high-intensity movements sequence included throw in, short sprint, including changes of direction.

where a_x is the mediolateral acceleration, a_y is the anteroposterior acceleration, and a_z is the vertical acceleration. Accel'Rate was processed with customized script in R Studio (Version R-4.0.2, R Foundation for Statistical Computing). These instantaneous values were summed to obtain the global workload of the players during the session analysed. For more readability, the final value obtained was divided by 100. This variable was chosen because the Accel'Rate was recently shown to better reflect the mechanical load than the classical PlayerLoad (18).

Table 1			
Description of small-sided games used the study.*			
	SSG 1: 4v4 (n 5 136)	SSG 2: 6v6FF (n 5 121)	SSG 3: 6v6FF (n 5 85)
Players	4 attackers vs. 4 defenders, 1 goalkeeper	6 attackers vs. 6 defenders, 1 goalkeeper	6 attackers vs. 6 defenders, 2 goalkeepers
SSG's organisation	3 Back players and 1 Pivot as attackers Defenders aligned at 6 m 1 goalkeeper	3 Back players, 2 Wings, and 1 Pivot as attackers Defenders aligned at 6 m 1 goalkeeper	3 Back players, 2 Wings, and 1 Pivot as attackers Defenders aligned at 6 m 2 goalkeepers
Rules	Typical handball rules Attackers only used tactical organizations specific to the team	Typical handball rules Attackers only used tactical organizations specific to the team	Typical handball rules Attackers only used tactical organizations specific to the team
Duration (min)	13 6 6 5	13 6 7	16 6 6 5
SSG's dimension			

*SSG5 small-sided game.

Power Law Modelling. To be able to compare the data of players with different minutes of play, all the data were first reported by minutes (i.e., $m \cdot \text{min}^{-2.1}$ and a.u.). Peak locomotor intensities were analyzed during different rolling average periods (0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 and 15 minutes). To estimate the decline in match and training intensity as duration increased, each measure of exercise intensity (i.e., TD, HS and Accel'Rate) was assessed relative to the rolling average duration as a power-law relationship (9,10,28) for each individual observation. This analysis was not possible for HIIT training sessions because they do not follow a power-law type of relationship, as a result of their programming approach (i.e., prescribed intensity). A power law curve describes nonlinear but clearly dependent relationships between 2 variables (x and y) and can be given by the equation: $y = cx^n$, where n and c are constants. A plot of log (locomotor variables) against log (time) allowed to obtain a straight line with a slope (n) and an intercept of c^n (9,10,28). Linear regressions were used, to reveal the values for n and c, for each measured variable (TD, HS, and Accel'Rate) and each condition (3 SSGs and matches). The exponential of c was calculated, and therefore, a predictive equation of running intensity (i) as a function of time (t) was achieved, using the formula: $i = 5 \cdot ct^n$. As such, running intensity was deemed to be proportionately related to the duration of the moving average window (i.e., time). Moreover, this approach has been used previously in the field of team sport, such as rugby (9,21) and soccer (31). Although physical output in team sports will always be dependent on game context and events (36), the intercept established from the power-law relationship reflects the theoretical highest intensity that occurs during match and training as time approaches 1 minute (9,31). The slope represents the rate of decline in peak locomotor intensity as exercise duration increases. These slope and intercept values were used for the analysis.

Statistical Analysis

The Kolmogorov-Smirnov normality test was performed to verify the distribution of each variable included in the analysis. For each variable, back transformed data were used for the descriptive statistics (mean \pm SD and range).

The first step of the analysis aimed to examine the overall peak locomotor intensity of different variable (TD, HS, and Accel'Rate) and assessed for potential difference between positions during competitive match-play. Slope and intercepts for each locomotor variable were first compared using linear mixed model, where player positions were treated as fixed effect, whereas players were considered as a random factor (15). The second set of linear mixed models aimed to investigate the difference in intercepts and slopes for each variable between matches and SSGs. Therefore, the event (matches or SSGs) was considered as fixed, whereas players were considered as a random factor (15).

Statistical analyses were performed using R statistical software (R. 3.1.0, R Foundation for Statistical Computing) using the lme4 package. Each model was further investigated with standardized differences (ES), based on Cohen's effect size principle. Standardization was performed with the estimated marginal means and associated variance provided by the generalised linear model. Threshold values for standardized differences were trivial (< 0.2), small (< 0.6), moderate (< 1.2), large (< 2), and very large (> 2), as describe by Hopkins (19). Probabilities were used to make a qualitative probabilistic mechanistic inference about the true differences in the changes, which were assessed in comparison to the smallest worthwhile change (0.2 \pm 3 pooled SDs). The scale was as follows: 25–75%, possible; 75–95%, likely; 95–99%, very likely; $\geq 99\%$, almost certain (2).

Results

Between-Player Differences in Peak Locomotor Intensity during Competitive Matches

The intercepts and slopes for each locomotor variable and position are provided in Figure 1 and Table 2. All rolling average periods for each position are provided in supplemental material. ^[E1]

During competitive matches, Back players sustained almost certainly higher TD intensity than Pivots (ES $6 \pm 90\%$ confidence limits: 0.60 ± 0.35), although no meaningful difference was observed for HS (0.0 ± 0.03) and Accel'Rate (0.20 ± 0.16) intensity. Back players also presented an almost certainly lower TD (1.0 ± 0.38), HS (3.20 ± 0.38), and Accel'Rate (0.70 ± 0.38) intensity than Wingers. The same results were found when comparing Pivots with Wingers (TD: 1.80 ± 0.40 , HS: 3.10 ± 0.40 and Accel'Rate: 0.70 ± 0.39).

Differences Between Competitive Matches and Small-Sided Games in Peak Locomotor Intensity

Differences between matches and SSGs format with regard to intercepts and slopes for each locomotor variable are provided in Table 3. All rolling average periods for each SSGs and position are provided in supplemental material (cf. Tables 1–5 in supplemental materials, <http://links.lww.com/JSCR/A317>). The comparison of HIIT and match outputs showed players to cover significantly more distance at high intensity (ES ≥ 2 for all variables). Peak total was 1.5–1.8 times greater; HSR, 2.1–3.4 times greater; and AR, 1.6–2 times greater during HIIT. The TD intensity intercept during competitive matches were almost certainly superior to all SSGs (6v6FF: 1.74 ± 0.20 ; 6v6HF: 3.56 ± 0.22 ; 4v4: 3.68 ± 0.21). Moreover, an almost certainly lower slope value was observed for 6v6FF compared with matches (2.059 ± 0.18). Trivial differences were found regarding 6v6HF (0.17 ± 0.17) and 4v4 (2.009 ± 0.16) for TD slope when compared with matches. Regarding HS, intercepts were almost certainly higher during matches than during SSGs (6v6FF: 1.33 ± 0.19 ; 6v6HF: 4.21 ± 0.27 ; 4v4: 5.94 ± 0.30). An almost certainly greater HS intensity slope was observed for 6v6FF (2.076 ± 0.18) compared with that of the matches. However, almost certainly lower HS intensity slope were observed for 6v6HF (1.97 ± 0.20) and 4v4 (1.90 ± 0.19) when compared with matches. Finally, competitive matches presented almost certainly higher Accel'Rate intensity intercept than all SSGs (6v6FF: 1.33 ± 0.19 ; 6v6HF: 3.31 ± 0.21 ; 4v4: 3.25 ± 0.20). Regarding the Accel'Rate slope, an almost certainly higher difference was observed for 6v6FF (2.021 ± 0.18), whereas almost certainly to possibly lower values were found for 4v4 (0.21 ± 0.16) and 6v6HF (0.37 ± 0.16), respectively, when compared with matches.

Discussion

The aim of the study was to characterize the peak locomotor intensity with a specific reference to players' positions and to assess if SSGs can allow players to reach similar peak locomotor intensity than during matches in elite handball.

The main findings of the study were as follows: (a) peak locomotor intensity during matches displayed moderate-to-large between-positions differences, with Wingers demonstrating the highest peak locomotor intensity and (b) the peak locomotor intensity during the 3 selected SSGs formats were moderately-to-largely lower than during matches.

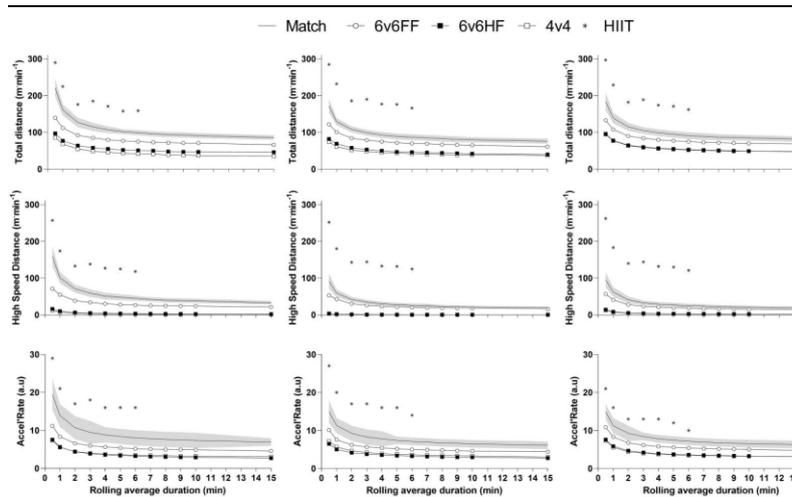


Figure 1. Peak locomotor intensity during match, SSGs and HIIT as a function of each rolling average period for playing position. HIIT 5 high-intensity interval training; SSG 5 small-sided game.

This study is the first to examine the peak locomotor intensity of elite handball players with regard to playing positions during competitive matches. Overall, Wingers demonstrated higher peak locomotor intensity during matches for all variables (i.e., TD, HS and Accel'Rate) compared with Back and Pivots. These differences with previous studies (27,34,39), where back players presented the highest TD and mechanical load (i.e., PlayerLoad) are not surprising because they investigated overall locomotor activity—although the present study described peak intensity. This further highlights the importance of the method employed when investigating match demands. For example, when considering the running intensity (TD) more than 15-minute windows, our present results were similar to those reported by Póvoas et al. for the whole match duration (81.6 7 vs. 82.6 15 $\text{m}\cdot\text{min}^{-2\ 1}$) (38). However, when comparing the peak locomotor intensity (127–156 $\text{m}\cdot\text{min}^{-2\ 1}$), TD was actually 1.7–2.4 times higher than that reported in previous studies (33,37,38,42). This seems logical because peak running intensity is influenced by the length of the rolling average window (9). Therefore, practitioners might need to consider those shorter duration of analysis to provide training program matching the actual locomotor activity experienced by player during matches (34,37,39). Despite the difference in methods used and focus (i.e., activity intensity vs. volumes), our conclusions echo those of previous studies, where Wingers presented the highest HS volumes in comparison with the other positions (3,27,42). This highlights the large level of specificity of the Winger

position (e.g., running back and forth over the full court length). Therefore, because of the highest TD, HS, and Accel'Rate observed, training programs may need to be individualized for them, by including, for example, top-up running sequences. However, it is worth mentioning that despite the high specificity of locomotor actions for each position (e.g., holding a position in the opponent's defense for Pivots or multiple accelerations and deceleration for Back players), similar mechanical loads intensity was observed. Although the calculation method is different than that of previous studies using PlayerLoad, it is not a surprise to find similar results between Pivots and Back players regarding TD (127.6 10 vs. 136.6 13, respectively) and mechanical load (11.6 2 vs. 11.6 2, respectively) because of the multicollinearity between those 2 variables (8,22). Despite the similar observed peak locomotor intensities (at the quantitative level), the positions require different actions (qualitative analysis) (27). For example, back players repeat more high-intensity tasks (i.e., accelerations, decelerations, changes of direction and jumps), whereas Pivots make more high-intensity quasi-isometric actions during blocks (26,27). Consequently, this highlights the importance to combine LPS with accelerometer data because they both provide different information about players' locomotor activity.

In the present study, the overall locomotor intensity (TD and HS) and mechanical load (i.e., Accel'Rate) during typical SSGs never reached the intensity observed during matches. This is contrary to

Table 2

Peak locomotor intensity per position and locomotor variables.*

	Total distance ($\text{m}\cdot\text{min}^{-2\ 1}$)				High-Speed Distance ($\text{m}\cdot\text{min}^{-2\ 1}$)				Accel'Rate (a.u)									
	Intercept	Slope	r	r	Intercept	Slope	r	r	Intercept	Slope	r							
Wingers	156.6	131 [‡]	2.0	0.27	0.03	0.97	96.6	121 [‡]	2.0	0.45	0.05	0.98	13.6	31 [‡]	2.0	0.30	0.03	0.97
Pivots	127.6	101 [†]	2.0	0.23	0.03	0.97	56.6	9	2.0	0.46	0.05	0.98	11.6	2	2.0	0.25	0.04	0.97
Back players	136.6	131 [‡]	2.0	0.24	0.03	0.98	57.6	11	2.0	0.49	0.05	0.98	11.6	2	2.0	0.26	0.03	0.98

*Data are presented as mean 6 SD.

[†]Difference from Back players.

[‡]Difference from Pivots. Only effect sizes > 0.6 with likely chances (> 75%) that the differences are true are reported.

Table 3
Peak locomotor intensity comparisons between match and small-sided games.*†

Variable	Match intercepts	Match slope	SSGs format	Parameters	Value	Estimate	SEE	p	Effect size (6 90%CI)
Total distance (m·min ⁻¹)	138 6 16	2 0.24 6 0.03	6v6F	Intercept	110 6 17	30	1.75	, 0.001	1.74 (1.55 to 1.94)
				Slope	2 0.21 6 0.06	2 0.03	0.01	, 0.001	2 0.59 (2 0.77 to 2 0.41)
				Intercept	72 6 19	67	1.64	, 0.001	3.56 (3.34 to 3.78)
				Slope	2 0.26 6 0.09	2 0.02	0.01	, 0.08	0.17 (0.00 to 0.33)
				Intercept	77 6 17	63	1.61	, 0.001	3.68 (3.47 to 3.89)
				Slope	2 0.24 6 0.06	0	0.01	, 0.99	2 0.09 (2 0.25 to 0.07)
High-speed distance (m·min ⁻¹)	66 6 20	2 0.47 6 0.06	6v6F	Intercept	45 6 14	22	1.05	, 0.001	1.33 (1.14 to 1.52)
				Slope	2 0.41 6 0.09	2 0.05	0.02	, 0.005	2 0.76 (2 0.94 to 2 0.59)
				Intercept	13 6 10	55	1.04	, 0.001	4.21 (3.94 to 4.48)
				Slope	2 0.77 6 0.17	2 0.32	0.02	, 0.001	1.97 (1.78 to 2.17)
				Intercept	10 6 5	58	1.02	, 0.001	5.94 (5.64 to 6.25)
				Slope	2 0.77 6 0.17	2 0.32	0.01	, 0.001	1.90 (1.71 to 2.08)
Accel'Rate (a.u)	12 6 2	2 0.27 6 0.04	6v6F	Intercept	8 6 3	4	0.19	, 0.001	1.33 (1.14 to 1.52)
				Slope	2 0.26 6 0.06	2 0.01	0.01	, 0.43	2 0.21 (2 0.39 to 2 0.04)
				Intercept	6 6 2	6	0.18	, 0.001	3.31 (3.10 to 3.51)
				Slope	2 0.3 6 0.08	2 0.03	0.01	, 0.001	0.37 (0.21 to 0.53)
				Intercept	6 6 2	6	0.17	, 0.001	3.25 (3.05 to 3.44)
				Slope	2 0.28 6 0.06	2 0.01	0.01	, 0.29	0.21 (0.05 to 0.37)

*SEE 5 standard error of estimate; SSG 5 small-sided game.

†Intercepts and slopes are presented as mean 6 SD.

what has been shown in different team sports (7,16,29,31,35). Indeed, in soccer, it has been shown that a 10v10 was able to reach similar or higher intensity than matches (31). Contrary to Lacombe et al. (31), the present study included only competitive matches (e.g., round 16 and quarterfinal of European Champions league cup). Moreover, in elite handball, congested fixtures (e.g., a match every 3–4 days over 30 weeks) could lead to a high magnitude of neuromuscular fatigue (11) and therefore might minimize the opportunity to perform training sessions at similar intensity than matches. Consequently, the use of SSGs might be only used for technical and tactical purposes, explaining the present results. From a practical standpoint, if match intensity is difficult to reach through SSGs in-season (12), practitioners could use isolated running drills (e.g., short or long interval, repeated sprint training) to reach similar or higher peak locomotor intensity than matches (as shown in Figure 1)—but only if the fixtures allow it.

It is worth mentioning that several limitations remain. The present results may be exclusively representative of the players (e.g., only 11 players) and the coaching style of the team examined in the present study. Indeed, different results could have been observed with other teams using different tactical systems, which could directly influence peak locomotor intensity (4). Consequently, caution should be taken when generalizing those results to other contexts. Additionally, only 3 types of SSGs were used. It is likely that other formats, including different pitch size, number of players, rules, inclusion of contacts or not, could lead to different results and still require further investigations. Finally, the similar Accel'Rate observed in both Back and Pivots, despite clearly different activity types shows the limitation of the variable that is not (yet) able to identify the nature of the movement. Consequently, future studies using recent video analysis systems, for example (24,45), may provide further insights into player's locomotor activity. Finally, characterizing the difference between handball and soccer players in the external load match demands requires a deeper knowledge of the handball activity, especially regarding the evolution of internal load during competition. Indeed, previous studies have shown that handball players spend less than 10% of their playing time below 60% of their maximum heart rate and more than 50% of their playing time above 80% of their maximum heart rate (27), which is similar with results observed in soccer (1). The analysis of heart rate

through the approach of peak intensities, which has never been conducted before, could provide answers.

To conclude, the peak locomotor intensity (i.e., running activity and mechanical load) of competitive matches in elite handball players was assessed for the first time and further compared with typical SSGs. The results highlighted some differences between positions (i.e., Back, Pivots, and Wingers) and variables (i.e., TD, HS, Accel'Rate), with Wingers presenting the highest peak locomotor intensity. However, none of the SSGs examined in the study allowed players to reach the peak locomotor intensity observed during matches. This novel information can be used to individualize players' physical preparation and improve the overall training load management of elite handball players. Future studies should consider the integration of contacts into the peak locomotor intensity analysis.

Practical Applications

The main practical applications of this research include the findings that Wingers were shown to sustain the highest peak locomotor activity. Therefore, a specific emphasis on high-intensity running may be required for this position. Moreover, any of the SSGs examined in this study allowed players to reach the peak locomotor intensities observed during matches. To prepare players adequately to match demands, practitioners may sometimes need to consider the use of isolated running drills (e.g., short intervals or repeated sprint). Finally, the use of LPSs systems allows for continuous and precise locomotor activity tracking. If such a technology is not available, data with specific reference to each playing position and SSGs are provided in the supplemental digital content of the article to inform practice.

References

1. Bangsbo J, Mohr M, Krstrup P. Physical and metabolic demands of training and match-play in the elite football player. *J Sports Sci* 24: 665–674, 2006.

IAUS

2. Batterham AM, Hopkins WG. Making meaningful inferences about magnitudes. *Int J Sports Physiol Perform* 1: 50–57, 2006.
3. Bilge M. Game analysis of Olympic, World and European championships in men's handball. *J Hum Kinet* 35: 109–118, 2012.
4. Bradley PS, Carling C, Archer D, et al. The effect of playing formation on high-intensity running and technical profiles in English FA Premier League soccer matches. *J Sports Sci* 29: 821–830, 2011.
5. Buchheit M, Laursen PB, Kuhnle J, et al. Game-based training in young elite handball players. *Int J Sports Med* 30: 251–258, 2009.
6. Buchheit M. The 30-15 intermittent fitness test: Accuracy for individualizing interval training of young intermittent sport players. *J Strength Cond Res* 22: 365–374, 2008.
7. Clemente FM, Wong DP, Martins FM, Mendes RS. Acute effects of the number of players and scoring method on physiological, physical, and technical performance in small-sided soccer games. *Res Sports Med* 22: 380–397, 2014.
8. David C, Julien C. The relationship between intensity indicators in small-sided soccer games. *J Hum Kinet* 46: 119–128, 2015.
9. Delaney JA, Thornton HR, Rowell AE, et al. Modelling the decrement in running intensity within professional soccer players. *Sci Med Football* 2: 86–92, 2017.
10. Delaney JA, Scott TJ, Thornton HR, et al. Establishing duration-specific running intensities from match-play analysis in rugby league. *Int J Sports Physiol Perform* 10: 725–731, 2015.
11. Dello Iacono A, Eliakim A, Padulo J, et al. Neuromuscular and inflammatory responses to handball small-sided games: The effects of physical contact. *Scand J Med Sci Sports* 27: 1122–1129, 2017.
12. Dello Iacono A, Martone D, Zagatto AM, et al. Effect of contact and no-contact small-sided games on elite handball players. *J Sports Sci* 36: 14–22, 2018.
13. Fleureau A, Lacomme M, Buchheit M, Couturier A, Rabita G. Validity of an ultra-wideband local positioning system to assess specific movements in handball. *Biol Sport* 37: 351–357, 2020.
14. Furlan N, Waldron M, Shorter K, et al. Running-intensity fluctuations in elite rugby sevens performance. *Int J Sports Physiol Perform* 10: 802–807, 2015.
15. Gilmore AR, Anderson RD, Rae AL. The analysis of binomial data by a generalized linear mixed model. *Biometrika* 72: 593–599, 1985.
16. Halouani J, Chtourou H, Gabbett T, Chaouachi A, Chamari K. Small-sided games in team sports training: A brief review. *J Strength Cond Res* 28: 3594–3618, 2014.
17. Higham DG, Pyne DB, Anson JM, Hopkins WG, Eddy A. Comparison of activity profiles and physiological demands between international rugby sevens matches and training. *J Strength Cond Res* 30: 1287–1294, 2016.
18. Hollville E, Couturier A, Guilhem G, Rabita G. A novel accelerometry-based metric to improve estimation of whole-body mechanical load. *Sensors (Basel)* 21: 3398, 2021.
19. Hopkins WG. Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Med* 30: 1–15, 2000.
20. Hoppe M W, Baumgart C, Polglaze T, Freiwald J. Validity and reliability of GPS and LPS for measuring distances covered and sprint mechanical properties in team sports. *PLoS One* 13: e0192708, 2018.
21. Howe ST. Quantifying & Characterising Peak Intensities of Professional Rugby Using GPS & Accelerometers. Institute for Health & Sport (IHES), 2020. [AU6]
22. Hulin BT, Gabbett TJ, Johnston RD, Jenkins DG. PlayerLoad variables: Sensitive to changes in direction and not related to collision workloads in rugby league match play. *Int J Sports Physiol Perform* 13: 1136–1142, 2018.
23. Iacono AD, Eliakim A, Meckel Y. Improving fitness of elite handball players: Small-sided games vs. high-intensity intermittent training. *J Strength Cond Res* 29: 835–843, 2015.
24. Johnston RD, Weaving D, Hulin BT, et al. Peak movement and collision demands of professional rugby league competition. *J Sports Sci* 37: 2144–2151, 2019.
25. Jones MR, West DJ, Crewther BT, Cook CJ, Kilduff LP. Quantifying positional and temporal movement patterns in professional rugby union using global positioning system. *Eur J Sport Sci* 15: 488–496, 2015.
26. Karcher C, Buchheit M. Competitive demands of elite handball. *ASPE-TAR Sports Med J* 3: 112–119, 2014.
27. Karcher C, Buchheit M. On-court demands of elite handball, with special reference to playing positions. *Sports Med* 44: 797–814, 2014.
28. Katz L, Katz JS. Fractal (power law) analysis of athletic performance. *Sports Med Train Rehabil* 5: 95–105, 1994.
29. Kunz P, Engel FA, Holmberg HC, Sperlich B. A meta-comparison of the effects of high-intensity interval training to those of small-sided games and other training protocols on parameters related to the physiology and performance of youth soccer players. *Sports Med Open* 5: 7, 2019.
30. Lacomme M, Piscione J, Hager J-P, Carling C. Fluctuations in running and skill-related performance in elite rugby union match-play. *Eur J Sport Sci* 17: 132–143, 2017.
31. Lacomme M, Simpson BM, Cholley Y, Lambert P, Buchheit M. Small-sided games in elite soccer: Does one size fit all? *Int J Sports Physiol Perform* 13: 568–576, 2018.
32. Lacomme M, Peeters A, Mathieu B, et al. Can we use GPS for assessing sprinting performance in rugby sevens? A concurrent validity and between-device reliability study. *Biol Sport* 36: 25–29, 2019.
33. Luig P, Manchado C, Perse M, Kristan M. Motion characteristics according to playing position in international men's team handball. In: 13th Annual Congress of the European College of Sports Science, 2008. [AU7]
34. Luteberget LS, Spencer M. High-intensity events in international women's team handball matches. *Int J Sports Physiol Perform* 12: 56–61, 2017.
35. Martin-Garcia A, Castellano J, Diaz AG, Cos F, Casamichana D. Positional demands for various-sided games with goalkeepers according to the most demanding passages of match play in football. *Biol Sport* 36: 171–180, 2019.
36. Mendez-Villanueva A, Buchheit M, Simpson B, Bourdon PC. Match play intensity distribution in youth soccer. *Int J Sports Med* 34: 101–110, 2013.
37. Michalsik LB, Aagaard P, Madsen K. Locomotion characteristics and match-induced impairments in physical performance in male elite team handball players. *Int J Sports Med* 34: 590–599, 2013.
38. Póvoas SC, Seabra AF, Ascensão AA, et al. Physical and physiological demands of elite team handball. *J Strength Cond Res* 26: 3365–3375, 2012.
39. Póvoas SC, Ascensão AA, Magalhães J, et al. Physiological demands of elite team handball with special reference to playing position. *J Strength Cond Res* 28: 430–442, 2014.
40. Rico-González M, et al. Accuracy and reliability of local positioning systems for measuring sport movement patterns in stadium-scale: A systematic review. *Appl Sci* 10: 5994, 2020. [AU8]
41. Roberts SP, Trewartha G, Higgitt RJ, El-Abd J, Stokes KA. The physical demands of elite English rugby union. *J Sports Sci* 26: 825–833, 2008.
42. Sibila M V, Vuleta D, Primož P. Position-related differences in volume and intensity of large-scale cyclic movements of male players in handball. *Kinesiology* 36: 58–68, 2004. [AU9]
43. Varley MC, Elias GP, Aughey RJ. Current match-analysis techniques' underestimation of intense periods of high-velocity running. *Int J Sports Physiol Perform* 7: 183–185, 2012.
44. Waldron M, Highton J. Fatigue and pacing in high-intensity intermittent team sport: An update. *Sports Med* 44: 1645–1658, 2014.
45. Weaving D, Sawczuk T, Williams S, et al. The peak duration-specific locomotor demands and concurrent collision frequencies of European Super League rugby. *J Sports Sci* 37: 322–330, 2019.
46. Whitehead S, Till K, Weaving D, et al. The duration-specific peak average running speeds of European super league academy rugby league match play. *J Strength Cond Res* 35: 1964–1971, 2019. [AU10]
47. Winter EM, Moughan RJ. Requirements for ethics approvals. *J Sports Sci* 27: 985, 2009.

Table Suppl 1 (Matches):

	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15
Total Distance (m·min⁻¹)												
Overall	192 ± 22	143 ± 13	117 ± 11	106 ± 9	100 ± 8	95 ± 8	92 ± 8	90 ± 8	88 ± 7	87 ± 7	85 ± 7	81 ± 7
Wingers	221 ± 24	161 ± 15	127 ± 13	115 ± 11	107 ± 9	102 ± 7	99 ± 7	96 ± 7	94 ± 7	93 ± 7	91 ± 7	86 ± 6
Pivots	172 ± 19	129 ± 10	108 ± 8	99 ± 8	93 ± 8	89 ± 8	87 ± 8	85 ± 7	83 ± 8	81 ± 8	80 ± 7	76 ± 7
Back players	184 ± 24	139 ± 14	115 ± 11	105 ± 9	99 ± 9	95 ± 9	91 ± 9	89 ± 9	87 ± 8	86 ± 8	85 ± 8	80 ± 7
High-Speed Distance (m·min⁻¹)												
Overall	125 ± 23	80 ± 13	57 ± 9	47 ± 8	41 ± 7	38 ± 6	35 ± 6	34 ± 6	32 ± 5	31 ± 5	30 ± 5	26 ± 4
Wingers	159 ± 26	101 ± 15	71 ± 11	59 ± 10	51 ± 9	48 ± 8	45 ± 7	42 ± 6	40 ± 6	39 ± 6	38 ± 6	33 ± 5
Pivots	91 ± 20	59 ± 10	42 ± 7	35 ± 6	30 ± 6	28 ± 5	26 ± 5	25 ± 5	23 ± 4	22 ± 4	21 ± 4	19 ± 4
Back players	95 ± 20	62 ± 13	41 ± 9	33 ± 6	29 ± 6	27 ± 6	25 ± 5	24 ± 5	22 ± 5	21 ± 5	21 ± 4	18 ± 4
Accel'Rate (a.u)												
Overall	17 ± 3	13 ± 3	10 ± 2	9 ± 2	8 ± 2	8 ± 2	8 ± 2	7 ± 1	7 ± 1	7 ± 1	7 ± 1	7 ± 1
Wingers	19 ± 4	14 ± 3	11 ± 3	9 ± 2	9 ± 2	8 ± 2	8 ± 2	8 ± 2	8 ± 2	8 ± 2	7 ± 2	7 ± 1
Pivots	15 ± 3	11 ± 2	9 ± 2	8 ± 2	8 ± 2	7 ± 1	7 ± 1	7 ± 1	7 ± 1	7 ± 1	6 ± 1	6 ± 1
Back players	15 ± 2	11 ± 2	9 ± 2	8 ± 1	8 ± 1	7 ± 1	7 ± 1	7 ± 1	7 ± 1	7 ± 1	7 ± 1	6 ± 1

Table Suppl 2 (6v6FF):

	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15
Total Distance (m·min⁻¹)												
Overall	131 ± 30	107 ± 23	89 ± 18	82 ± 16	78 ± 16	75 ± 15	74 ± 15	72 ± 15	70 ± 15	70 ± 14	69 ± 14	65 ± 14
Wingers	140 ± 34	112 ± 26	92 ± 20	85 ± 18	80 ± 17	77 ± 17	75 ± 17	73 ± 16	72 ± 16	71 ± 15	71 ± 14	66 ± 15
Pivots	122 ± 28	101 ± 22	84 ± 17	79 ± 15	75 ± 15	72 ± 15	70 ± 14	69 ± 14	67 ± 13	66 ± 13	65 ± 13	61 ± 13
Back players	133 ± 27	108 ± 20	90 ± 16	84 ± 15	80 ± 14	77 ± 14	75 ± 14	73 ± 14	72 ± 14	71 ± 14	70 ± 14	68 ± 14
High-Speed Distance (m·min⁻¹)												
Overall	62 ± 23	49 ± 16	34 ± 11	30 ± 10	27 ± 9	25 ± 9	24 ± 8	23 ± 8	22 ± 8	21 ± 7	21 ± 7	19 ± 6
Wingers	71 ± 28	55 ± 19	39 ± 13	34 ± 11	30 ± 10	28 ± 10	27 ± 10	25 ± 9	25 ± 9	24 ± 8	24 ± 8	21 ± 7
Pivots	53 ± 19	43 ± 13	30 ± 9	26 ± 8	23 ± 8	22 ± 7	21 ± 7	20 ± 7	19 ± 6	18 ± 6	18 ± 6	16 ± 5
Back players	57 ± 18	41 ± 12	28 ± 8	24 ± 7	21 ± 6	20 ± 6	18 ± 6	17 ± 6	17 ± 5	16 ± 5	15 ± 5	14 ± 4
Accel'Rate (a.u)												
Overall	11 ± 2	8 ± 2	6 ± 1	6 ± 1	6 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1
Wingers	11 ± 3	8 ± 2	7 ± 1	6 ± 1	6 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1
Pivots	10 ± 2	8 ± 1	6 ± 1	6 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	4 ± 1
Back players	11 ± 4	8 ± 4	7 ± 3	6 ± 3	6 ± 3	6 ± 3	5 ± 3	5 ± 3	5 ± 2	5 ± 2	5 ± 2	5 ± 1

Table Suppl 3 (6v6HF):

	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15
Total Distance (m·min⁻¹)												
Overall	91 ± 23	74 ± 19	62 ± 16	57 ± 14	54 ± 13	51 ± 13	50 ± 12	48 ± 12	47 ± 12	46 ± 11	46 ± 11	44 ± 9
Wingers	97 ± 26	77 ± 21	64 ± 16	58 ± 15	55 ± 14	52 ± 13	51 ± 13	50 ± 12	48 ± 12	47 ± 12	47 ± 11	46 ± 10
Pivots	82 ± 21	69 ± 18	58 ± 16	53 ± 14	50 ± 13	47 ± 12	46 ± 11	45 ± 11	44 ± 10	43 ± 10	42 ± 10	40 ± 8
Back players	95 ± 21	77 ± 18	64 ± 15	59 ± 14	56 ± 14	54 ± 13	52 ± 13	51 ± 13	50 ± 13	49 ± 13	49 ± 13	48 ± 10
High-Speed Distance (m·min⁻¹)												
Overall	8 ± 9	5 ± 6	3 ± 3	2 ± 3	2 ± 2	1 ± 2	1 ± 2	1 ± 1	1 ± 1	1 ± 1	1 ± 1	1 ± 1
Wingers	12 ± 11	7 ± 7	4 ± 4	3 ± 3	3 ± 3	2 ± 2	2 ± 2	2 ± 2	2 ± 2	2 ± 2	2 ± 2	1 ± 1
Pivots	3 ± 7	2 ± 4	1 ± 3	1 ± 2	1 ± 1	1 ± 1	0 ± 1	0 ± 1	0 ± 1	0 ± 1	0 ± 1	0 ± 1
Back players	12 ± 9	7 ± 6	5 ± 4	3 ± 3	3 ± 3	3 ± 2	2 ± 2	2 ± 2	2 ± 2	2 ± 2	2 ± 2	2 ± 1
Accel'Rate (a.u)												
Overall	8 ± 2	6 ± 2	5 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1
Wingers	9 ± 3	6 ± 2	5 ± 1	5 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	3 ± 1
Pivots	7 ± 2	6 ± 2	5 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1
Back players	7 ± 2	6 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1

Table Suppl 4 (4v4):

	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15
Total Distance (m·min⁻¹)												
Overall	86 ± 26	69 ± 21	57 ± 18	52 ± 16	49 ± 15	48 ± 13	46 ± 13	44 ± 13	43 ± 12	42 ± 12	42 ± 12	40 ± 10
Wingers	86 ± 30	68 ± 25	55 ± 20	49 ± 17	46 ± 16	43 ± 15	42 ± 14	41 ± 14	39 ± 14	38 ± 13	37 ± 13	35 ± 12
Pivots	74 ± 23	61 ± 19	52 ± 16	48 ± 15	45 ± 14	44 ± 12	42 ± 12	41 ± 11	40 ± 11	39 ± 11	39 ± 10	37 ± 9
Back players	96 ± 25	78 ± 20	65 ± 17	60 ± 16	57 ± 15	55 ± 13	53 ± 13	52 ± 13	51 ± 13	50 ± 13	49 ± 12	47 ± 11
High-Speed Distance (m·min⁻¹)												
Overall	10 ± 13	6 ± 8	4 ± 6	3 ± 4	2 ± 4	2 ± 3	2 ± 3	2 ± 3	2 ± 3	1 ± 2	1 ± 2	1 ± 2
Wingers	16 ± 19	10 ± 13	6 ± 9	5 ± 7	4 ± 6	4 ± 5	3 ± 5	3 ± 5	3 ± 4	3 ± 4	2 ± 4	2 ± 3
Pivots	3 ± 7	2 ± 4	1 ± 2	1 ± 2	1 ± 1	1 ± 1	0 ± 1	0 ± 1	0 ± 1	0 ± 1	0 ± 1	0 ± 1
Back players	14 ± 10	8 ± 7	5 ± 4	4 ± 3	3 ± 3	3 ± 2	3 ± 2	2 ± 2	2 ± 2	2 ± 2	2 ± 2	2 ± 1
Accel'Rate (a.u)												
Overall	7 ± 2	5 ± 2	4 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1
Wingers	8 ± 3	6 ± 2	4 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1
Pivots	7 ± 2	5 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1
Back players	8 ± 2	6 ± 2	5 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1

Table Suppl 5 (HIIT):

	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15
Total Distance (m·min⁻¹)												
Wingers	290 ± 5	225 ± 4	176 ± 13	185 ± 7	171 ± 10	168 ± 9	159 ± 5	-	-	-	-	-
Pivots	289 ± 6	232 ± 9	186 ± 21	190 ± 7	177 ± 14	176 ± 15	166 ± 7	-	-	-	-	-
Back players	297 ± 9	229 ± 7	182 ± 19	189 ± 9	174 ± 13	171 ± 13	162 ± 4	-	-	-	-	-
High-Speed Distance (m·min⁻¹)												
Wingers	257 ± 6	174 ± 7	133 ± 12	138 ± 7	127 ± 8	125 ± 7	118 ± 2	-	-	-	-	-
Pivots	252 ± 10	180 ± 11	143 ± 21	144 ± 10	133 ± 15	132 ± 14	125 ± 2	-	-	-	-	-
Back players	262 ± 7	183 ± 9	140 ± 19	144 ± 11	132 ± 14	130 ± 13	121 ± 5	-	-	-	-	-
Accel'Rate (a.u)												
Wingers	29 ± 5	21 ± 3	17 ± 3	18 ± 2	16 ± 2	16 ± 2	16 ± 1	-	-	-	-	-
Pivots	27 ± 2	20 ± 2	17 ± 3	17 ± 2	16 ± 2	16 ± 2	14 ± 1	-	-	-	-	-
Back players	21 ± 2	16 ± 2	13 ± 2	13 ± 2	13 ± 2	12 ± 2	10 ± 1	-	-	-	-	-

ÉTUDE 3 : EFFET DE L'ENCOMBREMENT DU CALENDRIER SUR LA PÉRIODISATION DE LA CHARGE D'ENTRAÎNEMENT CHEZ LES JOUEURS DE HANDBALL ÉLITE

THE EFFECT OF CONGESTED FIXTURES ON TRAINING LOAD PERIODIZATION IN ELITE HANDBALL PLAYERS

Publication associée :

Antoine Fleureau, Giuseppe Rabita, Cédric Leduc, Mathieu Lacome, and Martin Buchheit. (2021). "The effect of congested fixtures on training load periodization in elite Handball players." *Biology of Sport*. *Soumis*

Objectif de l'étude

Nous avons pu montrer, lors de notre revue de littérature, l'importance pour les entraîneurs et préparateurs physique d'adapter la CE afin de permettre aux joueurs de pouvoir performer tout au long de la saison. Nous avons également mis en évidence qu'il est nécessaire d'ajuster cette CE en fonction du rythme des matchs car l'enchaînement de ceux-ci provoquent une diminution des capacités physiques des joueurs. Or nous n'avons relevé qu'une seule étude portant sur l'organisation des entraînements en Handball selon le rythme des rencontres malgré l'organisation des calendriers officiels qui, pour les meilleures équipes, implique de jouer tous les 3-4 jours en moyenne. Ainsi il semble qu'il persiste un manque de connaissance sur la manière dont peuvent être régulés les entraînements en fonction du rythme des match, et alors moduler la CE permettant de conserver le plus haut niveau de performance possible, et limiter les risques de blessures. En effet, cette seule étude ayant porté sur le sujet ne s'est intéressée qu'à la CEi mais n'a pas pris en compte la CEe, limitant de ce fait l'extrapolation de ses résultats. L'application d'approches de surveillance de l'activité des joueurs similaires à celles utilisées dans d'autres sports d'équipe, tel que le Rugby et le Football, avec une technologie LPS permettrait de décrire la dynamique de CE lors de l'enchaînement des matchs en Handball élite. Ainsi, l'objectif de cette étude est de comparer la CEi et la CEe quotidienne lors des 3 séances d'entraînement précédant le match en fonction du rythme de ces derniers. Notre hypothèse pour cette dernière étude sera que l'activité des joueurs, durant les séances d'entraînement, est régulée en fonction du rythme des matchs. Ceci implique donc de mesurer des volumes et/ou des intensités d'entraînements (CEi et CEe) plus faible lorsque les matchs s'enchainent avec des durées plus courtes.

Méthodologie

Approche expérimentale du problème

De même que lors de notre seconde étude nous nous sommes appuyés sur une analyse rétrospective des données collectées durant les saisons 2018-2019 et 2019-2020. Nous avons donc analysé un total de 129 sessions d'entraînements représentant 1121 observations individuelles. Tout comme lors de notre seconde étude, nous avons dû limiter l'analyse de la seconde saison (2019-2020) à une demi-saison du fait de la pandémie. De même, nous n'avons

pas inclus la saison 2020-2021 car nous nous intéressions à l'impact du rythme des matchs sur l'organisation des entraînements, or cette saison a été marquée par de très nombreuses modifications du calendrier effectué en dernière minute, toujours du fait de la pandémie et des protocoles sanitaires mis en place par les différents pays. En effet, l'équipe support de notre étude participait à l'ensemble des compétitions nationales (Lidl Starligue, première division de championnat de France ; coupe de France et coupe de la Ligue) et à l'European Champion's League au niveau continental. Quatre schémas hebdomadaires différents, avec des durées différentes entre les matchs, ont été analysés (durée de 3, 4, 5 et 6 jours ; cf. Tableau 16). Pour chaque schéma hebdomadaire, les entraînements à 3, 2 et 1 jour du match à venir (MD3, MD2, MD1) ont été analysés, avec respectivement 93, 534 et 494 observations individuelles provenant de 14, 62 et 53 séances d'entraînement. Les séances individuelles telles que l'entraînement supplémentaire ou la rééducation ont été exclues de l'analyse. Bien que nous n'ayons pas analysé les matchs dans cette étude, l'absence de dispositif LPS lors des matchs en déplacement implique que certaines données sont manquantes dans le cas des entraînements à l'extérieur, notamment les veilles de matchs. C'est pourquoi nous avons préféré ne nous intéresser qu'aux entraînements précédant les matchs à domicile.

Participants

Cette étude s'appuie sur la même durée et les mêmes sujets que notre seconde étude, à la simple différence que nous n'avons pas de nécessité de limiter l'analyse aux joueurs ayant un temps de jeu effectif minimal de 30 minutes. En effet, puisque nous ne nous intéressions uniquement aux entraînements et que tous les joueurs, quel que soit leur temps de jeu, participait à l'ensemble de ceux-ci, il n'y avait aucun impact du temps de jeu effectif individuel sur l'activité en entraînements. De ce fait, les données ont été recueillies auprès de 16 joueurs (29 ± 6 ans, 193 ± 8 cm, 95 ± 12 kg) d'une équipe professionnelle élite française de Handball sur deux saisons consécutives (2018/2019 et 2019/2020). Ces données n'incluent que les séances d'entraînement, car nous n'avons pas l'ambition d'analyser l'activité des joueurs en match en fonction du rythme de ceux-ci. L'ensemble des données ont été recueillies lors de sessions à domicile, toujours du fait de l'installation à domicile du système de suivi. Les joueurs ont été regroupés en fonction de leur position de jeu (ailiers [$n=7$], pivots [$n=3$], joueurs arrière [$n=6$]). Ces données sont issues du suivi quotidien des joueurs au cours duquel les activités des joueurs ont été mesurées de manière routinière tout au long de chaque saison.

Matériel

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressés aux deux aspects de la CE, à savoir la CEe et la CEi. Ainsi différents paramètres ont été utilisés pour déterminer chacune de ces deux variables.

Charge d'entraînement externe

Comme pour nos précédentes études, l'activité des joueurs a été enregistrée à l'aide de l'outil LPS Kinexon™ permettant des mesures à une fréquence de 20Hz et incluant un dispositif accélérométrique embarqué fonctionnant à 100Hz (Kinexon™, Kinexon GMBH, Munich, Allemagne). La configuration de cet outil était bien évidemment la même que lors de nos études antérieures, basé sur 14 antennes, positionnées autour du terrain de Handball sur trois niveaux différents, et de balises portées par les joueurs au centre du haut du dos, toujours à l'aide de la brassière du fabricant. Le processus de mesure de la position employé par cet outil était bien évidemment le même (différence de temps d'arrivée, le Two-Way Ranging et l'angle d'arrivée). Cet outil nous a permis de récupérer directement après un traitement interne effectué par le fabricant, les données de DT et de DHV, comme pour la seconde étude. De la même manière que lors de notre étude précédente, nous avons calculé l'AR comme une mesure globale de la CE puisqu'elle est une représentation de la quantité de mouvement effectuée par les joueurs.

Charge d'entraînement interne

En ce qui concerne la CEi, nous nous sommes appuyés sur les méthodes de RPE et de sRPE (cf. 4. DÉFINITION DE LA CHARGE D'ENTRAÎNEMENT EN SPORTS COLLECTIFS). Pour rappel, la RPE est une mesure subjective de l'intensité de l'entraînement par le joueur tandis que la sRPE correspond à la multiplication de cette RPE par le temps de pratique (durée de l'entraînement) en minutes. Nous avons conservé la classique échelle modifiée d'évaluation de l'effort perçu en 10 points (CR10) pour la mesure de la RPE. Cette dernière a été demandée systématiquement après la session d'entraînement de manière individuelle, et ce dans un laps de temps inférieur à 45 minutes afin de s'assurer que les sujets déclarent une RPE pour l'ensemble de la session d'entraînement.

Traitement des données

Nous avons donc choisi trois variables représentatives de la CEe, et une deux variables pour la CEi. Afin d'être cohérent, puisque la RPE peut être considéré comme une variable correspondant à l'intensité de la CEi de l'entraînement et la sRPE correspondant plutôt au volume de cette CEi, nous avons tenu à proposer des variables respectivement représentatives du volume et de l'intensité de la CEe. C'est pourquoi nous avons transformé nos données de DT, DHV et AR, qui correspondent à des volumes d'activité, pour les rapporter à la durée des entraînements et ainsi obtenir des données représentatives des intensités. Ainsi nous avons donc quatre variables respectivement pour le volume et l'intensité des entraînements, avec trois correspondant à la CEe et une pour la CEi. En dehors de cela, et du calcul de l'AR tel que nous avons l'expliqué auparavant, aucun traitement n'a été effectué sur les données.

Analyse statistique

Comme lors de notre étude précédente, nous avons commencé par vérifier la normalité de la distribution de nos données à l'aide du test de Kolmogorov-Smirnov pour chacune des variables étudiées. Celui ayant été concluant, nous avons pu utiliser, comme lors de notre seconde étude, des modèles linéaires mixtes pour comparer les résultats obtenus pour chacun des jours d'entraînement étudiés. Pour chaque analyse, le nombre de jours entre deux matchs (c'est-à-dire 3, 4, 5, 6) a été inclus comme effet fixe, tandis que les joueurs ont été inclus comme effets aléatoires. Comme lors de notre seconde étude, nous avons approfondi l'analyse de ces modèles à l'aide des différences standardisées (ES), sur la base du principe de la taille de l'effet de Cohen. Les valeurs seuils pour les différences standardisées, issus des travaux de Hopkins, étaient les suivantes : triviales $< 0,2$; petites $< 0,6$; modérées $< 1,2$; grandes < 2 et très grandes > 2 . Nous avons également reproduit l'inférence probabiliste qualitative sur les véritables différences observées à l'aide de probabilités, évaluées en comparaison au plus petit changement détectable ($0,2 \times$ les écarts-type regroupés). L'échelle était la suivante : 25 - 75 %, possible ; 75 - 95 %, probable ; 95 - 99 %, très probable ; > 99 %, presque certain. Pour s'assurer que seules les différences significatives sont présentées, et pour limiter l'impact de la grande taille de l'échantillon analysé, seules les différences standardisées $> 1,2$ (grandes) ayant une probabilité d'être vraies > 95 % (très probable) ont été rapportées.

Résultats

Toutes les données présentées dans la présente étude correspondent à la moyenne de tous les joueurs ayant participé aux séances d'entraînement. Les principaux résultats que nous pouvons mettre en exergue sont, d'une part, des intensités et des volumes d'activités inférieurs à MD-3 et MD-2 lorsque respectivement 4 et 3 jours étaient disponibles entre deux matchs (cf. Vert, Tableau 16), et d'autre part une intensité et un volume d'activité constant veille de match (cf. Bleu Tableau 16). Il est tout de même important de relever également que l'AR par minutes restait constant quel que soit le nombre de jours entre deux matchs.

Durée entre 2 matchs	Contenu de la session						
3 jours				Match	MD-2 Entrainement	MD-1 Entrainement	Match
4 jours			Match	MD-3 Entrainement	MD-2 Entrainement	MD-1 Entrainement	Match
5 jours		Match	MD-4 Entrainement	MD-3 Entrainement	MD-2 Entrainement	MD-1 Entrainement	Match
6 jours	Match	MD-5 Entrainement	MD-4 Entrainement	MD-3 Entrainement	MD-2 Entrainement	MD-1 Entrainement	Match

Tableau 16 : Description des schémas hebdomadaires analysés. Les jours de match sont mis en exergue en rouge, en noirs les entrainements non étudiés, en vert les Entrainements présentant une diminution du volume et de la charge d'entraînement, en bleu les entrainements équivalent en intensité et en volume et en blanc les entrainements sans caractéristique notable.

Discussion

Puisque la littérature scientifique sur la gestion de la CE en Handball se réduit à une étude, il nous est difficile de discuter de nos résultats sur cette activité en particulier. Néanmoins, puisque ce sujet a déjà été très détaillé dans d'autres sports, tel que le Football et le Rugby, nous pouvons discuter nos résultats au regard de ces informations. Toutefois, puisque notre étude était très descriptive nous n'avons que peu de résultats prépondérants. Le premier d'entre eux est évidemment la régulation apportée, à la fois en termes de volume et d'intensité, les avant-veilles de match et 3 jours avant le match, lorsque la durée entre deux matchs était de 3 et 4 jours respectivement (cf. Tableau 16, Figure 31, Figure 32). Ce résultat est en accord avec ce que Clemente et al. (2019) ont pu montrer en Handball à partir des données de CEi et de questionnaires subjectifs d'état de formes recueillis auprès des joueurs (27,7 % moins importante à trois jours du match à venir pour des durées de trois jours entre deux matchs). De même nos résultats sont cohérents avec ceux issus du Football mis en évidence par Anderson

et al. (2016) et Oliveira et al. (2019), qui démontre une diminution de la charge d'entraînement les lendemains de match (Anderson : TD : - 33 % à MD-3 ; Oliveira : RPE : - 43 % à MD-3 et - 16 % à MD-2, TD : - 30 % à MD-3 et - 23 % à MD-2). En effet, cela semble logique, mais il est important de préciser que lorsque l'on parle de l'entraînement à trois jours du match à venir pour une durée totale de 4 jours entre deux matchs, cela correspond au lendemain du match précédent (cf. Tableau 16). Il en est de même lorsque l'on parle de l'entraînement d'avant-veille de match pour une durée globale de 3 jours entre deux rencontres. Cet ajustement de CE correspond alors à une volonté des entraîneurs de minimiser la fatigue tout en optimisant la récupération des joueurs. Il est également intéressant de noter que lorsque la durée entre deux matchs est suffisamment longue (5 ou 6 jours), alors nous observons une nette diminution dans les volumes et les intensités de DHV (passant de 527 m à 284 m et de $5,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ à $3,1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pour 6 jours ; de 384 m à 185 m et de $4,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ à $1,9 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pour 5 jours). Cette diminution est possible du fait de la haute intensité et des hauts volumes de DHV à trois jours du match suivant. C'est d'ailleurs lors de ces entraînements que l'on observe les intensités et les volumes les plus hauts (2,3 et 3,2 fois plus haut que les veilles de match). La diminution observée est donc simplement liée à un retour à des volumes et des intensités classiques d'entraînement. Le fait d'observer cette augmentation de la CE à trois jours du match à venir confirme également le fait que les entraîneurs cherchent à moduler cette CE en fonction du rythme des matchs. Ainsi, ils proposent des sessions présentant une plus grande part de DHV dès lors que le rythme des matchs le permet. Par ailleurs nous pouvons souligner que quel que soit le nombre de jours entre deux matchs, l'AR et la DT rapporté par minutes sont toujours similaire ($3,3 \pm 0,6 \text{ u.a}$ et $46,9 \pm 7,3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$). Cela signifie une certaine constance dans la CEe, bien que des différences puissent être mesurées en termes de DT, DHV et DHV/min. nous pouvons comprendre cette information comme une volonté de l'entraîneur de conserver une constance dans l'intensité des entraînements mais également que cette constance s'organise au travers d'exercices différents permettant d'ajuster les volumes et les intensités de courses à haute vitesse. Ce contraste, entre la constance de certaines variables de CEe et la variation d'autres de ces variables, montre bien la volonté de l'entraîneur de moduler les entraînements pour les adapter au rythme des matchs. En effet, nous avons constaté une diminution du volume et de l'intensité des courses à haute vitesse les jours précédant les matchs sans pour autant qu'il y ait de variation marquée sur les volumes et les intensités concernant la DT. Cela reflète bien la volonté de la part de l'entraîneur de proposer des contenus d'entraînement différents selon le rythme des matchs mais également

en fonction du nombre de jours restant avant la prochaine rencontre. Toutefois, malgré ces adaptations et ces régulations de la CE mise en place par les entraîneurs, nous devons noter la constance des entraînements de veille de match. Ces derniers présentent en effet des volumes et des intensités de travail extrêmement stable quel que soit le rythme des matchs (DT : 4295 ± 957 ; DHV : $224,8 \pm 213,1$; AR : $303,6 \pm 70,7$; sRPE : $416,3 \pm 170,3$; DT/min : $47,1 \pm 7,3$; HS/min : $2,5 \pm 2,2$; AR/min : $3,3 \pm 0,6$; RPE : $4,5 \pm 1,7$). Bien que ce résultat puisse paraître paradoxale, il est conforme à ce qu'il a pu être mis en évidence dans le Football par Oliveira et Anderson dans leur études respectives (Oliveira : DT : $3576,8 \pm 686,2$; RPE : $2,5 \pm 0,3$; sRPE : $216,9 \pm 42,1$ et Anderson : DT : $2678,5 \pm 269,2$). De même, Clemente avait présenté des résultats similaires dans le Handball à partir des données subjectives des joueurs (différence standardisée entre $-0,53$ et $0,72$ entre lorsqu'il y a 3 jours ou plus entre deux matchs versus lorsqu'il y a moins de trois jours). Ainsi, il semble classique pour les sports collectifs intermittent de conserver un entraînement stable en termes de volume et d'intensité les veilles de matchs. Cela peut naturellement s'expliquer par la nécessité de procéder à des derniers ajustements techniques et tactiques lors de cet entraînement. De plus, favoriser des entraînements constant veille de match permet aux joueurs de créer une forme de routine dès la veille de match ce qui leur permet de se préparer de manière optimale pour la compétition à venir. Ainsi l'apport de cette étude est donc bien de mettre en évidence l'organisation de la CE lors des entraînements précédent les matchs en fonction du rythme de ces derniers, et ce dans le cadre d'une équipe élite du Handball européen. Nous noterons tout de même qu'il est nécessaire d'approfondir cette étude pour évaluer les performances des joueurs lorsque les rencontres s'enchaînent ainsi que tout au long de la saison, afin de vérifier la capacité de telles stratégies de réduction de CE sont efficaces pour optimiser la récupération des joueurs.

Limites

Nous pouvons tout de même relever plusieurs limites à notre étude. La première est similaire à notre seconde étude puisqu'il s'agit du fait que n'ayant pu analyser que 16 joueurs d'une unique équipe, nos résultats peuvent n'être représentatifs que de l'équipe examinée, et difficilement généralisable. En effet, des équipes utilisant des philosophies d'entraînement différentes, tel que l'intégration ou non du travail physique dans la séance ou la mise en place de stratégies de récupération, pourraient directement influencer la dynamique de CE observée. Par conséquent, il nous est difficile de généraliser nos résultats à d'autres contextes. De plus, dans cette étude,

seuls les entraînements à domicile ont été analysés, mais les entraînements à l'extérieur effectués veille de match peuvent influencer la dynamique de CE. En effet, les déplacements ne pouvant pas toujours être organisés de manière optimale pour la gestion de la fatigue et de la récupération des joueurs en raison de l'heure, de la durée et des conditions de transport. Cela peut avoir un impact sur l'organisation de l'entraînement et par conséquent sur la gestion de CE.

Conclusion

Nous pouvons donc valider notre hypothèse de travail puisque nous avons bien mis en évidence une diminution de la CE associée à une réduction du nombre de jours disponibles entre deux matchs. Ceci est particulièrement vrai à MD-3 lorsque l'intervalle entre deux compétitions est de quatre jours et MD-2 lorsque l'intervalle est de trois jours. Cela suggère que les entraîneurs régulent la CE pour offrir aux joueurs à la fois la possibilité de récupérer du match précédent et de se préparer pour le suivant. Ainsi, plus le temps entre les matchs est long, plus les entraîneurs cherchent à imposer une haute CE 2 et 3 jours avant le match suivant, et inversement. Toutefois la validation de notre hypothèse ne peut être que partielle parce qu'aucune adaptation n'a pu être détectée la veille de match. En effet, cet entraînement reste constant à la fois en termes d'intensité et de volume quel que soit l'intervalle entre deux matchs. Ces entraînements de veille de matchs ne présentent pas d'ajustement de CE car une certaine routine est préférable ce jour-là, permettant la répétition d'exercices spécifiques, un travail d'affinage de la tactique ou encore le renforcement de la confiance des joueurs.

Applications pratiques

Cette étude bien que très descriptive est néanmoins parfaitement adaptée aux besoins des encadrements des équipes élités de Handball, puisque cela leur permettra de comprendre comment la dynamique de CE est organisée aujourd'hui. Établir le constat de ce qui est en place est primordiale pour pouvoir questionner le fonctionnement actuel et ainsi être en mesure de l'optimiser. Ainsi notre étude permet d'améliorer la régulation de la charge de travail, ce qui pourrait être bénéfique pour améliorer les performances et se protéger contre d'éventuelles blessures. Par ailleurs, les différences significatives, constatées dans les CE quotidiennes en fonction du rythme des matchs permettent de mieux appréhender la périodisation hebdomadaire, notamment par une optimisation de la planification de la CE en fonction du nombre de matchs par semaine.

PLOS ONE

The effect of congested fixtures on training load periodization in elite handball players. --Manuscript Draft--

Manuscript Number:	PONE-D-21-38916
Article Type:	Research Article
Full Title:	The effect of congested fixtures on training load periodization in elite handball players.
Short Title:	Training load periodization in Handball
Corresponding Author:	Antoine Fleureau INSEP Paris, FRANCE
Keywords:	Periodisation; Team Sport; Congested Fixture; Monitoring, Training Load
Abstract:	<p>Objectives The aims of the study was to compare the daily internal and external load of the 3 training sessions preceding the match according to turnover duration. Material and methods Training and match data were collected among 16 players (25±7y, 191±8cm, 89±12kg) belonging to an elite French Handball team, for a total of 1272 individual observations. Players' locomotor activity was recorded using a 20-Hz local positioning system to derive external load measures including total distance (TD[m]), high-speed running distance (HS[m]), and mechanical load (Accel'Rate[a.u]). Rating of Perceived Exertion (RPE) and session-RPE (sRPE) were used as measured of internal load. Four different microcycles varying in length were examined (3-, 4-, 5-, and 6-day turnover); with only matchday minus 3, 2 and 1 day (MD1, MD2, MD3) analysed. Results While the external training load was similar across all turnovers at MD-1, MD-2 presented a lower load when the turnover length was the shortest (3-day turnover). Similarly, MD-3 had the lowest load in a 4-day turnover. Conclusions Coaches adapt their training load to allow players to both recover from previous matches and get prepared for the following – with the longer the time between matches, the greater the opportunity to work and load the players 2 and 3 days before the next match – and vice versa.</p>
Order of Authors:	Antoine Fleureau Giuseppe Rabita, HDR Cedric Leduc, PhD Mathieu Lacome, PhD Martin Buchheit, HDR

Powered by Editorial Manager® and ProduXion Manager® from Aries Systems Corporation

3 **Abstract:**

4 **Purpose:** The study aimed to compare the daily internal and external load of the 3 training
5 sessions preceding the match according to turnover duration. **Method:** Training and match
6 data were collected among 16 players (25±7y, 191±8cm, 89±12kg) belonging to an elite French
7 Handball team, for a total of 1272 individual observations. Players' locomotor activity was
8 recorded using a 20-Hz local positioning system to derive external load measures including
9 total distance (TD[m]), high-speed running distance (HS[m]), and mechanical load
10 (Accel'Rate[a.u]). Rating of Perceived Exertion (RPE) and session-RPE (sRPE) was used as a
11 measure of internal load. Four different microcycles varying in length were examined (3-, 4-,
12 5-, and 6-day turnover); with only match-day minus 3, 2 and 1 day (MD-1, MD-2, MD-3)
13 analysed. **Results:** While the external training load was similar across all turnovers at MD-1,
14 MD-2 presented a lower load when the turnover length was the shortest (3-day turnover).
15 Similarly, MD-3 had the lowest load in a 4-day turnover. **Conclusions:** Coaches adapt their
16 training load to allow players to both recovers from previous matches and get prepared for the
17 following – with the longer the time between matches, the greater the opportunity to work and
18 load the players 2 and 3 days before the next match – and vice versa.

19 **Key Words:**

20 Periodisation; Team Sport; Congested Fixture; Monitoring, Training Load

21 **Introduction:**

22 Handball is a strenuous contact Olympic team sport that highlights running, jumping, sprinting,
23 and a range of high-intensity upper-body actions over two halves of 30 minutes, interspersed
24 by a 15-min half-time break (1). Due to its professionalisation, handball is confronting similar
25 schedule constraints to other elite team sports such as football or basketball. For example,
26 international players can play more than 80 matches during a season for over 9-10 months with
27 an average of 1 game every 3 or 4 days. This raises the concern of players management to
28 mitigate injury risk and optimise performance.

29 Other studies in rugby or football clearly described the impact of congested periods on players
30 activity (2-12). Some studies showed that cumulative neuromuscular fatigue increases as
31 physical performance deteriorates after a match-congested period (8, 10-12). Indeed, players
32 experienced a gradual decrease in running capacity and a compromised ability to perform
33 technical actions. Concretely, players became slower and less efficient at straight and curve
34 sprints, changing direction and vertically oriented explosive events (i.e., vertical jump and half-
35 squat) (8, 11, 12). Secondly, these authors also demonstrated that injury risk increases during
36 the match-congested period (4, 6). For example, the injury rate during match-play was
37 significantly higher during the congested period (43.3 ± 14.2) than during the uncongested
38 period (18.6 ± 2.3) (4, 6).

39 Finally, congested periods seems to affect tactical performance by allowing less time for player
40 collective coordination, which may require specific recovery interventions to manage match
41 demands beyond individual physical recovery (7). Indeed, Folgado et al. (7) presented evidence
42 that the tactical performance, measured by players' movement dyadic synchronisation in both
43 longitudinal (goal-to-goal) and lateral (side-to-side) displacement axes, decreased during
44 matches in congested fixtures. These timing differences were particularly pronounced during

45 low-intensity movements, suggesting that players may desynchronise their previously
46 synchronised movements during low-risk situations.

47 Altogether, these findings indicate that optimised and well-programmed training and recovery
48 strategies are necessary to avoid (or reduce) possible decreases in physical performance (8) and
49 to maintain a low injury rate (6) during congested periods. For this purpose, technical,
50 performance and medical staff of elite team sports work closely together to optimise players'
51 performance and health, while 1) managing training load and content in accordance to match
52 fixtures, and 2) continuously monitoring player's response to training and competition (via
53 objective or/and subjective monitoring) (13-16).

54 In addition, depending on each team's context (e.g. match results, league standings, player's
55 availability), coaches, sports scientists, and medical staff of elite teams should carefully manage
56 the player's time on the field of play during both training and matches (8). For example, staff
57 may generally consider reducing training volume on some days, or increasing it during others,
58 as a potential solution to allow players to recover from previous matches but also get prepared
59 for the following ones (8). They also often consider player substitution in games to preserve
60 players neuromuscular capabilities during congested competitive phases (6, 12). Moreover,
61 players who present a lower synchronisation level during congested fixtures might benefit from
62 specific positioning and group coordination training sessions, complementary or interrelated to
63 the physical recovery, during this period (7).

64 However, unlike in football or other sports, information on the external workload of handball
65 players during these congested fixtures has been seldomly studied, which is likely explained by
66 the limited use of indoor tracking/monitoring tools. The recent development and validation of
67 portable local positioning systems (LPS) have opened a new era in handball monitoring (17).

68 To our knowledge, only one study has reported the internal load and associated responses of
69 handball players over a congested fixture period (18). This study found that the main variation

70 between normal and congested weeks occurred two and three days before the match, with
71 greater load values in normal weeks than in congested periods. However, this study was based
72 only on subjective internal variables, which limits the extrapolation of these results.
73 Applying similar monitoring approaches to those used in other outdoor team sports
74 environments (19-22) with such LPS technology would allow for the description of workload
75 dynamics during these congested fixtures in elite handball. Thus, will provide meaningful
76 information to coaches and coaching staff to maximise performance.
77 Therefore, the aim of this study was 1) to compare the daily internal and external load of the 3
78 training sessions preceding the match according to turnover duration.

79 **Methods:**

80 *Participants:*

81 Data were collected among 16 players (29±6 years, 193±8 cm, 95±12 kg) from a professional
82 French handball team during two consecutive seasons (2018-2019 and 2019-2020), including
83 official matches and training sessions. Players were grouped according to their playing
84 position (Wingers [n=7], Pivots [n=3], Back players [n=6]). There was no difference in the
85 organisation of the training according to the playing time of each player. Thus, regardless of
86 their playing time in the match, all players participated in the whole training. These data arose
87 from the daily player monitoring in which player activities were routinely measured throughout
88 each season. Oral informed consent was obtained from all players, jointly from the team
89 manager and physical trainer, and provided to all other staff members. All data were fully
90 anonymized, therefore ethics committee clearance was not required (23). Nevertheless, the
91 study conformed to the recommendations of the Declaration of Helsinki.

92 *Study Overview:*

93 A retrospective longitudinal research design was used. Match and training load data were
94 collected throughout the 2018/19 and 2019/20 seasons (pre-season and competitive season)
95 from July 2018 until March 2020 at the club's training ground with a local positioning system
96 (LPS) (17). The 2020-2021 season was not included in this study due to the sanitary situation
97 which perturbed the organisation of the matches during all the season. The team analysed in
98 this study participated in all national (i.e., First League Championship, National Cup, and
99 League Cup) and continental (European Champion's League) competitions. Four different
100 weekly schedule patterns with different turnover lengths were used (3-, 4-, 5-, and 6-day
101 turnover). For each weekly pattern, match-day minus 3, 2 and 1 (MD-1, MD-2, MD-3) were
102 analysed, with 494, 534 and 93 individual observations from 53, 62 and 14 training sessions,
103 respectively. Individual sessions such as additional training or rehabilitation were excluded
104 from the analysis. Moreover, only home games were included due to the absence of other LPS
105 devices in other clubs during away games. Although we did not analyse the matches in this
106 study, this implies that some data are missing in the case of away training, especially at MD-1.

107

108

Insert Table 1

109

110 *Materials:*

111 *External load.* Players' activity was recorded using a 20 Hz LPS system and 100 Hz
112 embedded accelerometer devices (Kinexon™, Kinexon GMBH, Munich, Germany) (17).
113 The Kinexon™ Ultrawideband (UWB) system consisted of 14 antennas, positioned around the
114 handball playing field at three different heights, and tags worn by the players in the centre of
115 the upper back, using the manufacturer harness. The signals were transmitted to the antennas
116 using UWB technology in a frequency range of 4.25-7.25 GHz. The field position of the tag

117 was calculated by a proprietary algorithm based on a combination of different methods such as
118 Time Difference of Arrival, Two-Way Ranging, and Angle of Arrival (Kinexon GmbH,
119 Germany).

120 The validity of the Kinexon™ LPS device has been established and showed a small
121 standardised typical error of estimate (from 0.06 to 0.48) compared with 3-dimensions motion
122 capture (Vicon®) for the sprint, lateral, and specific handball movements (17, 24).
123 Additionally, the inter-unit coefficient of variation was reported to range from 2.1 to 9.2% (24).
124 *Internal Load.* The internal training load for each session was measured using the Rating of
125 Perceived Exertion (RPE) and session-RPE (sRPE) methods (25) for each. Training intensity
126 was measured using a modified 10-point Rating of Perceived Exertion Scale
127 (CR-10: RPE) (26). The sRPE method involved multiplying the training duration in minutes by
128 the RPE (25). To ensure the subjects reported an RPE for the entire training session, the RPE
129 was taken after the completion of the session using previously described methods (27).

130 *Data Processing:*

131 Data were processed by the specific Kinexon™ software to obtain total (TD, m) and high-speed
132 running distance (HS, distance run at a velocity above 14.5 km·h⁻¹). Additionally, we
133 calculated the Accel'Rate (a.u) from the raw inertial data as an overall measure of mechanical
134 load (28). Accel'Rate was calculated as follow:

$$135 \quad \text{Accel'Rate} = |\sqrt{(a_{x_i})^2 + (a_{y_i})^2 + (a_{z_i})^2} - \sqrt{(a_{x_{i-1}})^2 + (a_{y_{i-1}})^2 + (a_{z_{i-1}})^2}|,$$

136 where a_x is the mediolateral acceleration, a_y is the anteroposterior acceleration and a_z is the
137 vertical acceleration. Accel'Rate has proceeded with customised script in R Studio (Version
138 R-4.0.2, R Foundation for Statistical Computing). These instantaneous values were summed to
139 obtain the global workload of the players during the session analysed. For more readability, the

140 final value obtained was divided by 100. This variable was chosen because the Accel'Rate™
141 was recently shown to better reflect the mechanical load than the classical PlayerLoad™ (28).

142

143 *Statistical analysis:*

144 Statistical analyses were performed using R statistical software (R 3.1.0, R Foundation for
145 Statistical Computing) using the *lme4* and *multcomp* package. Data are presented as mean ± SD
146 unless otherwise stated. Means and standard deviations were derived from the generalized
147 linear model, with the distribution and link function contingent on the nature of the dependent
148 variable. The normal distribution was validated with a Kolmogorov-Smirnov test, for all
149 variables. For each analysis, the number of days between two matches (i.e., 3, 4, 5, 6) was
150 included as a fixed effect, while players were included as random effects. Each model was
151 further investigated with standardised differences (ES), based on Cohen's effect size principle.
152 Standardisation was performed with the estimated marginal means and associated variance
153 provided by the generalised linear model. Threshold values for standardised differences were
154 (trivial) <0.2 (small) <0.6 (moderate) <1.2 (large) <2 and very large (>2), as describe by
155 Hopkins (29). Probabilities were used to make a qualitative probabilistic mechanistic inference
156 about the true differences in the changes, which were assessed in comparison to the smallest
157 worthwhile change ($0.2 \times$ pooled SDs). The scale was as follows: 25-75%, possible; 75-95%,
158 likely; 95-99%, very likely; >99%, almost certain (29). To ensure that only significant
159 differences are presented, and to limit the impact of the large sample size analysed, only large
160 differences with very likely chances of being true (>95%) have been reported.

161 **Results:**

162 All the data presented in the current study stand for the mean of all the players participating in
163 the training sessions.

164 Volume-related variables for the different turnover lengths are displayed in Figure 1. Intensity-
165 related variables are displayed in Figure 2.

166 *****

167 **Insert Figure 1 and 2**

168 *****

169 Moreover, descriptive, and inferential statistics are presented in Table 2, 3 and 4 for MD-3,
170 MD-2 and MD-1, respectively.

171 *****

172 **Insert Table 2, 3 and 4**

173 *****

174 While the external training load volume (cf. Figure 1) was similar across all turnovers at MD-
175 1 (cf. Table 4), MD-2 presented a lower load when the turnover length was the shortest, 3-day
176 turnover (cf. Table 3). Similarly, MD-3 had the lowest load in a 4-day turnover (cf. Table 2).

177 Regarding the variables related to external training load intensity (cf. Figure 2), similar results
178 were found (cf. Table 2, 3, 4), with some exceptions. Indeed, AR by minutes was not different
179 despite the day analysed and the turnover length (cf. Table 2, 3, 4). Moreover, the RPE at MD-
180 1 for a 5-day turnover was higher than a 4 and 6-day turnover (cf. Table 4).

181 **Discussion:**

182 The aim of this study was 1) to characterise the effect of turnover length on daily internal and
183 external load of D-3 to D-1 sessions The main findings of the study were: 1) the shorter the
184 turnover, the likely lower the training load (in volume and intensity) at MD-3 or MD-2 and 2)
185 despite different turnover length the training load (in volume and intensity) was similar at
186 MD-1.

187 *The effect of short turnover on MD-3 and MD-2*

188 The present study showed that when a short turnover (3 or 4 days) was compared with a longer
189 one, the training load tended to decrease on days 2 and 3, respectively.

190 To the best of our knowledge, this is the first study to examine the difference in training load
191 dynamics as a function of match turnovers among elite handball players. Although a precedent
192 study assessed the changes in internal load (i.e. sRPE) (18). This study highlighted a similar
193 trend to the present results by comparing normal and congested weeks. Indeed, this study
194 reveals that larger variations between normal and congested weeks occurred at MD-2 and
195 MD-3, with greater values of load occurring in normal weeks. From an external load
196 perspective, similar patterns have been observed in professional football (30, 31). Indeed,
197 Andersen et al. (30) showed a lower total running distance, and distance covered in all speed
198 categories (TD: from 4394 ± 63 m to 2912 ± 51 m), during training sessions with a 3-day
199 turnover than a longer one, in football. Moreover, Oliveira et al. (31) also showed, in football,
200 a similar decrease in the external (distance covered in different speed categories
201 (TD: from 7068 ± 250 m to 3314 ± 203) and internal (sRPE: from 245 ± 124 m to 217 ± 82 m)
202 training load with a shorter turnover length, from a 6-day or more turnover to 3-day turnover.

203 Therefore, those results are not surprising especially when we consider that a 3-day turnover
204 MD-2 was also D+1, as well as MD-3 for a 4-day turnover. Consequently, coaches decrease
205 training load to minimise fatigue and optimise recovery. From a practical standpoint, this study
206 highlights the practice from one of the best Handball teams in Europe and technical staff could
207 consider those results to shape their training week when congested fixture occurs. Nevertheless,
208 future study needs to assess the fatigue responses over congested fixtures to see if such training
209 load reduction strategies are meant to optimise players status recovery.

210 *The regulation of training load during the last day leading up to the match*
211 Despite fluctuations in training load during MD-3 or -2, no statistically significant difference
212 in volume and intensity variables were observed with the data recorded at MD-1. This result is
213 similar to those reported by Clemente et al. (18) regarding the internal load in handball. This
214 study showed that the internal load at MD-1 remained significantly similar (sRPE from
215 347 ± 107 to 339 ± 55 ; SEE: 0.10) regardless of the type of week analysed (3).
216 This similarity of the training load at MD-1 despite turnover length was also observed in
217 football (30-32). Indeed, Oliveira et al. (31) presented also a non-significative difference in
218 internal load (sRPE: 217 ± 38) at MD-1 whatever the schedule (31). Anderson et al. confirmed
219 this result in football also for external load variables with a low variation of the total distance
220 covered during the different weeks analysed (30).
221 This is not surprising as MD-1 is usually used as a priming session from a physical standpoint
222 and the last technical and tactical adjustment. Therefore, this highlights that MD-1 remains a
223 constant despite fixtures changes.
224 However, Anderson et al. showed that the intensity variables (average speed) were higher with
225 a 3-day turnover than with a longer one. Moreover, Anderson et al. (30) also showed that during
226 shorter turnover lengths, training durations at MD-1 are shorter, from 70 minutes for a 7-day or
227 longer turnover, to 60 minutes for a 6-day turnover, and 50 ± 2 minutes for a 3-day turnover
228 (30). Although the authors did not analyse this information further, the decrease in training
229 duration seems to be the most relevant parameter to explain the higher training intensity, which
230 could explain the difference with the results reported in the current study.

231 **Limitations:**

232 It is worth mentioning that several limitations remain. The present results may be exclusively
233 representative of the players (e.g., only 16 players) and the coaching style of the team examined
234 in the present study. Indeed, teams using different training philosophies (e.g., integration of

235 physical work within the session or not) or recovery strategies, for example, could directly
236 influence the workload dynamic observed. Consequently, caution should be taken when
237 generalizing those results to other contexts. Furthermore, in this study, only home training were
238 analysed, but away training perform at MD-1 can influence the workload dynamics. Indeed,
239 travel cannot always be optimally organised for the management of player fatigue due to the
240 timing, duration, and conditions of transport, which can have an impact on the organisation of
241 training and consequently on workload management.

242 **Practical applications:**

- 243 • This study provides useful information regarding the internal and external workload
244 dynamic of an elite European handball team playing in the European Champions
245 League. Furthermore, informed knowledge of workload dynamics allows for
246 improved workload regulation which could be beneficial for improving performance
247 and protecting against possible injuries (4, 6, 8, 10-12). It is therefore important for
248 fitness and sports technicians to determine the optimal amount of training a player
249 needs to continue to improve their fitness, while reducing the likelihood of injury,
250 to maximise their performance during competition.
- 251 • For coaches, this study may provide important information to consider when
252 planning training sessions. The significant differences found in daily workloads
253 according to the match schedule could have implications for weekly periodisation,
254 in particular by allowing for appropriate planning of the workload according to the
255 number of matches per week.
- 256 • Data collected from the training monitoring can also be useful to facilitate
257 communication between the support staff and the coaching staff.

258 **Conclusion:**

259 We examined for the first time in elite handball players the external training workload dynamic
260 across multiple match turnovers. The results showed a decrease in external and internal
261 workload as turnover length decreased, especially at MD-3 for a 4-day turnover and at MD-2
262 for a 3-day turnover. However, no difference in neither internal nor external workload was
263 found at MD-1, regardless of the turnover length. This suggests that coaches adapt their training
264 load to allow players to both recovers from previous matches and get prepared for the following
265 – with the longer the time between matches, the greater the opportunity to work and load the
266 players 2 and 3 days before the next match – and vice versa. Interestingly also, the overall (low)
267 volume and intensity of MD-1 training is unlikely to require loading adjustment for optimal
268 player preparation and may be related to the fact that a certain routine is likely required on that
269 day (i.e., repeating specific drills, working on tactics, building confidence, etc).

270

271 **References**

- 272 1. Buchheit M, Laursen PB, Kuhnle J, Ruch D, Renaud C, Ahmaidi S. Game-based
273 training in young elite handball players. *Int J Sports Med.* 2009;30(4):251-8.
- 274 2. Carling C, Dupont G. Are declines in physical performance associated with a reduction
275 in skill-related performance during professional soccer match-play? *J Sports Sci.*
276 2011;29(1):63-71.
- 277 3. Clemente FM, Silva R, Chen Y-S, Aquino R, Praça GM, Castellano J, et al.
278 Accelerometry-workload indices concerning different levels of participation during congested
279 fixture periods in professional soccer: a pilot study conducted over a full season. *International*
280 *journal of environmental research and public health.* 2021;18(3):1137.
- 281 4. Dellal A, Lago-Penas C, Rey E, Chamari K, Orhant E. The effects of a congested fixture
282 period on physical performance, technical activity and injury rate during matches in a
283 professional soccer team. *Br J Sports Med.* 2015;49(6):390-4.
- 284 5. Djaoui L, Wong del P, Pialoux V, Hautier C, Da Silva CD, Chamari K, et al. Physical
285 Activity during a Prolonged Congested Period in a Top-Class European Football Team. *Asian*
286 *J Sports Med.* 2014;5(1):47-53.
- 287 6. Dupont G, Nedelec M, McCall A, McCormack D, Berthoin S, Wisloff U. Effect of 2
288 soccer matches in a week on physical performance and injury rate. *Am J Sports Med.*
289 2010;38(9):1752-8.
- 290 7. Folgado H, Duarte R, Marques P, Sampaio J. The effects of congested fixtures period
291 on tactical and physical performance in elite football. *J Sports Sci.* 2015;33(12):1238-47.
- 292 8. Freitas TT, Pereira LA, Reis VP, Fernandes V, Alcaraz PE, Azevedo P, et al. Effects of
293 a Congested Fixture Period on Speed and Power Performance of Elite Young Soccer Players.
294 *Int J Sports Physiol Perform.* 2021;1(aop):1-7.

- 295 9. Gualtieri A, Rampinini E, Sassi R, Beato M. Workload Monitoring in Top-level Soccer
296 Players During Congested Fixture Periods. *Int J Sports Med.* 2020;41(10):677-81.
- 297 10. Marqués-Jiménez D, Calleja-González J, Arratibel I, Delextrat A, Terrados N. Fatigue
298 and recovery in soccer: evidence and challenges. *The Open Sports Sciences Journal.*
299 2017;10(1).
- 300 11. Moreira A, Bradley P, Carling C, Arruda AF, Spigolon LM, Franciscon C, et al. Effect
301 of a congested match schedule on immune-endocrine responses, technical performance and
302 session-RPE in elite youth soccer players. *J Sports Sci.* 2016;34(24):2255-61.
- 303 12. Twist C, Highton J, Daniels M, Mill N, Close G. Player Responses to Match and
304 Training Demands During an Intensified Fixture Schedule in Professional Rugby League: A
305 Case Study. *Int J Sports Physiol Perform.* 2017;12(8):1093-9.
- 306 13. Harper DJ, Carling C, Kiely J. High-Intensity Acceleration and Deceleration Demands
307 in Elite Team Sports Competitive Match Play: A Systematic Review and Meta-Analysis of
308 Observational Studies. *Sports Med.* 2019;49(12):1923-47.
- 309 14. Julian R, Page RM, Harper LD. The Effect of Fixture Congestion on Performance
310 During Professional Male Soccer Match-Play: A Systematic Critical Review with Meta-
311 Analysis. *Sports Medicine.* 2021;51(2):255-73.
- 312 15. Quarrie KL, Raftery M, Blackie J, Cook CJ, Fuller CW, Gabbett TJ, et al. Managing
313 player load in professional rugby union: a review of current knowledge and practices. *British*
314 *Journal of Sports Medicine.* 2017;51(5):421-7.
- 315 16. Teixeira JE, Forte P, Ferraz R, Leal M, Ribeiro J, Silva AJ, et al. Monitoring
316 accumulated training and match load in football: A systematic review. *International journal of*
317 *environmental research and public health.* 2021;18(8):3906.

- 318 17. Fleureau A, Lacombe M, Buchheit M, Couturier A, Rabita G. Validity of an ultra-
319 wideband local positioning system to assess specific movements in handball. *Biology of Sport*.
320 2020.
- 321 18. Clemente FM, Oliveira H, Vaz T, Carriço S, Calvete F, Mendes B. Variations of
322 perceived load and well-being between normal and congested weeks in elite case study handball
323 team. *Research in Sports Medicine*. 2019;27(3):412-23.
- 324 19. Akenhead R, Nassis GP. Training Load and Player Monitoring in High-Level Football:
325 Current Practice and Perceptions. *Int J Sports Physiol Perform*. 2016;11(5):587-93.
- 326 20. Buchheit M, Simpson BM. Player-Tracking Technology: Half-Full or Half-Empty
327 Glass? *Int J Sports Physiol Perform*. 2017;12(Suppl 2):S235-S41.
- 328 21. Linke D, Link D, Lames M. Validation of electronic performance and tracking systems
329 EPTS under field conditions. *PLoS One*. 2018;13(7):e0199519.
- 330 22. Pino-Ortega J, Oliva-Lozano JM, Gantois P, Nakamura FY, Rico-González M.
331 Comparison of the validity and reliability of local positioning systems against other tracking
332 technologies in team sport: A systematic review. *Proceedings of the Institution of Mechanical*
333 *Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*. 2021:1754337120988236.
- 334 23. Winter EM, Maughan RJ. Requirements for ethics approvals. *J Sports Sci*.
335 2009;27(10):985.
- 336 24. Hoppe MW, Baumgart C, Polglaze T, Freiwald J. Validity and reliability of GPS and
337 LPS for measuring distances covered and sprint mechanical properties in team sports. *PLoS*
338 *One*. 2018;13(2):e0192708.
- 339 25. Foster C, Florhaug JA, Franklin J, Gottschall L, Hrovatin LA, Parker S, et al. A new
340 approach to monitoring exercise training. *J Strength Cond Res*. 2001;15(1):109-15.

- 341 26. Borg G, Hassmen P, Lagerstrom M. Perceived exertion related to heart rate and blood
342 lactate during arm and leg exercise. *European journal of applied physiology and occupational*
343 *physiology*. 1987;56(6):679-85.
- 344 27. Impellizzeri FM, Rampinini E, Coutts AJ, Sassi A, Marcora SM. Use of RPE-based
345 training load in soccer. *Med Sci Sports Exerc*. 2004;36(6):1042-7.
- 346 28. Hollville E, Couturier A, Guilhem G, Rabita G. A Novel Accelerometry-Based Metric
347 to Improve Estimation of Whole-Body Mechanical Load. *Sensors (Basel)*. 2021;21(10):3398.
- 348 29. Hopkins WG. Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Med*.
349 2000;30(1):1-15.
- 350 30. Anderson L, Orme P, Di Michele R, Close GL, Morgans R, Drust B, et al. Quantification
351 of training load during one-, two- and three-game week schedules in professional soccer players
352 from the English Premier League: implications for carbohydrate periodisation. *J Sports Sci*.
353 2016;34(13):1250-9.
- 354 31. Oliveira R, Brito J, Martins A, Mendes B, Calvete F, Carrico S, et al. In-season training
355 load quantification of one-, two- and three-game week schedules in a top European professional
356 soccer team. *Physiol Behav*. 2019;201:146-56.
- 357 32. Stevens TG, de Ruiter CJ, Twisk JW, Savelsbergh GJ, Beek PJ. Quantification of in-
358 season training load relative to match load in professional Dutch Eredivisie football players.
359 *Science and Medicine in Football*. 2017;1(2):117-25.
- 360

361 **Tables & Figures captions:**

362 Table 1: Weekly turnover descriptions,

363  Match Day;  Training Day

364

365 Table 2: Descriptive and inferential statistics for MD-3. Number of * is for qualitative
366 inference: * possibly, ** likely, *** very likely, and **** almost certain difference. SEE
367 stands for standard error of estimate.

368

369 Table 3: Descriptive and inferential statistics for MD-2. Number of * is for qualitative
370 inference: * possibly, ** likely, *** very likely, and **** almost certain difference. SEE
371 stands for standard error of estimate.

372

373 Table 4: Descriptive and inferential statistics for MD-1. Number of * is for qualitative
374 inference: * possibly, ** likely, *** very likely, and **** almost certain difference. SEE
375 stands for standard error of estimate.

376

377 Figure 1: Variables related to external and internal training load volume: TD, HS, AR, sRPE.
378 The horizontal black line represents the mean, while the vertical black line represents \pm SD,
379 and each grey point represents a player's data during a training session.

380

381 Figure 2: Variables related to external and internal training load intensity: TD/min, HS/min,
382 AR/min, RPE. The horizontal black line represents the mean, while the vertical black line
383 represents \pm SD, and each grey point represents a player's data during a training session.

Figure 1

[Click here to access/download;Figure;Figure 1.tiff](#) ■

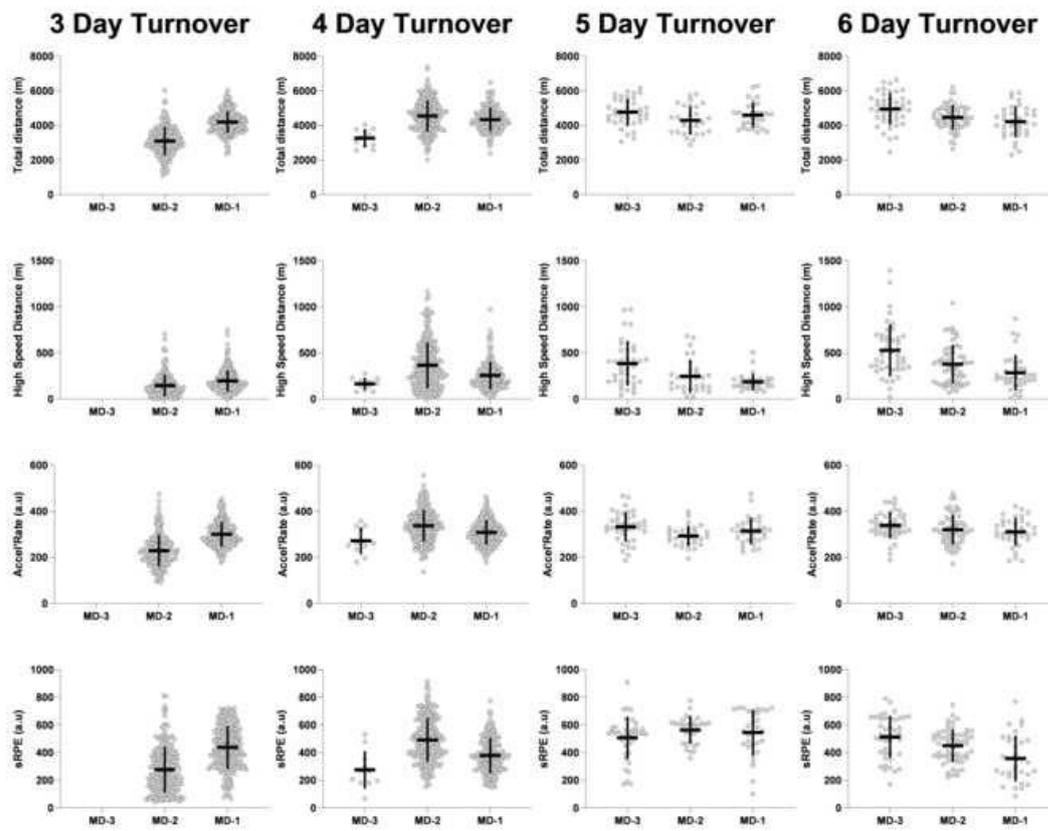


Figure 2

[Click here to access/download;Figure;Figure 2.tiff](#) ■

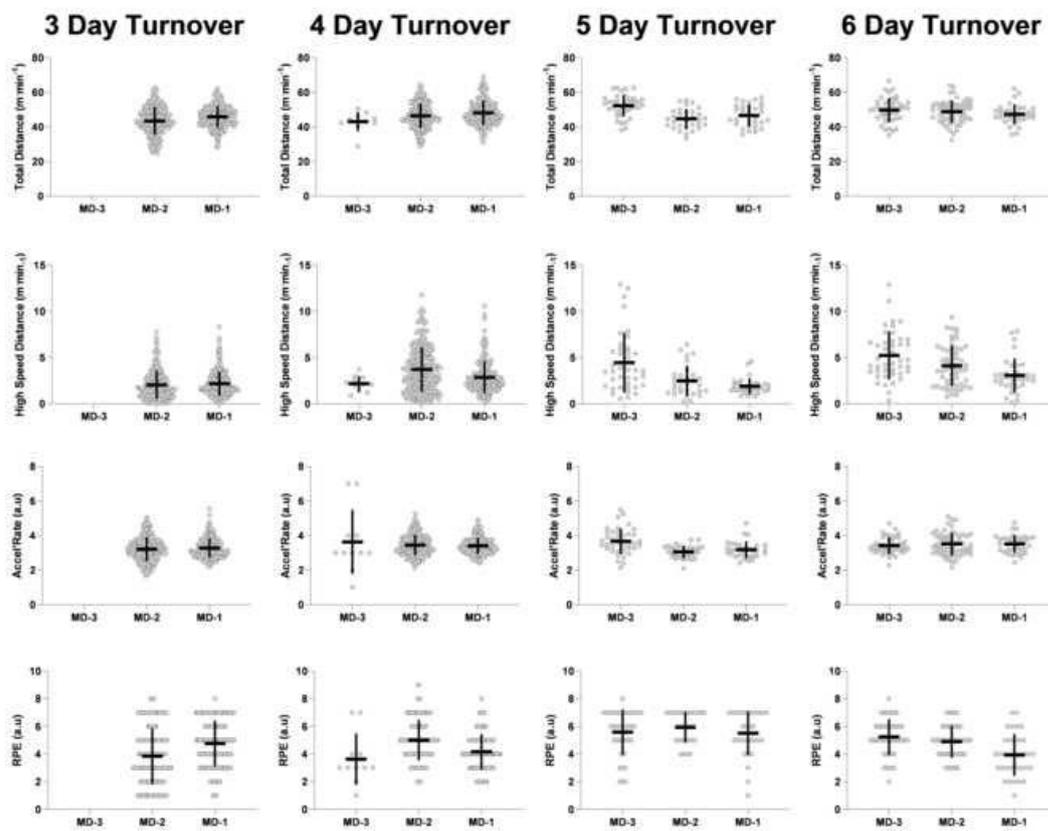


Table 1

[Click here to access/download;Figure;Table 1.docx](#)

Table 1

3-day Turnover			✂	🌐 MD-2	🌐 MD-1	✂
4-day Turnover		✂		🌐 MD-3	🌐 MD-2	🌐 MD-1
5-day Turnover		✂		🌐 MD-4	🌐 MD-3	🌐 MD-2
6-day Turnover	✂			🌐 MD-5	🌐 MD-4	🌐 MD-3
				🌐 MD-2	🌐 MD-1	✂

Only MD-3 / MD-2 / MD-1 were analysed.

Table 2

[Click here to access/download;Figure;Table 2.docx](#) ■

Table 2

MD-3		Total Distance (m)	High-Speed Distance (m)	Accel'Rate (a.u)	sRPE (a.u)	Total Distance (m.min ⁻¹)	High-Speed Distance (m.min ⁻¹)	Accel'Rate (a.u)	RPE (a.u)
		4 vs. 5 Days	Est. (SEE)	1390 (245)	219 (85)	75 (17)	230 (52)	8.6 (2.1)	2.3 (0.9)
	p.value	<0.001	0.025	<0.001	<0.001	<0.001	0.041	0.435	<0.001
	Effect size (90%CI)	-2.06 (-2.72 to -1.39)	-1.03 (-1.63 to -0.43)	-0.97 (-1.57 to -0.38)	-1.54 (-2.17 to -0.91)	-1.51 (-2.14 to -0.89)	-0.78 (-1.37 to -0.20)	-0.17 (-0.74 to 0.40)	-1.16 (-1.77 to -0.56)
		****	***	****	****	****	**	*	****
4 vs. 6 Days	Est. (SEE)	1661 (234)	373 (82)	84 (17)	238 (51)	6.4 (2.0)	3.1 (0.9)	-0.02 (0.19)	1.5 (0.5)
	p.value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.005	0.003	0.995	0.010
	Effect size (90%CI)	-1.94 (-2.58 to -1.29)	-1.41 (-2.02 to -0.80)	-1.17 (-1.77 to -0.57)	-1.59 (-2.22 to -0.97)	-0.99 (-1.58 to -0.40)	-1.28 (-1.89 to -0.68)	0.28 (-0.29 to 0.85)	-1.01 (-1.60 to -0.42)
		****	****	****	****	***	***		***
5 vs. 6 Days	Est. (SEE)	271 (146)	154 (52)	9 (10)	8 (33)	-2.2 (1.3)	0.8 (0.6)	-0.26 (0.12)	-0.4 (0.3)
	p.value	0.144	0.009	0.678	0.970	0.196	0.396	0.078	0.425
	Effect size (90%CI)	-0.21 (-0.58 to 0.16)	-0.54 (-0.92 to -0.17)	-0.10 (-0.47 to 0.27)	-0.04 (-0.41 to 0.33)	0.39 (0.02 to 0.76)	-0.27 (-0.64 to 0.10)	0.41 (0.04 to 0.78)	0.28 (-0.09 to 0.65)
		*	***			*		**	

Table 3

MD-2		Total Distance	High-Speed	Accel'Rate	sRPE	Total Distance	High-Speed	Accel'Rate	RPE
		(m)	Distance (m)	(a.u)	(a.u)	(m.min ⁻¹)	Distance (m.min ⁻¹)	(a.u)	(a.u)
3 vs. 4 Days	Est.	1511	227	112	217	3.2	1.7	0.25	1.2
	(SEE)	(70)	(17)	(5)	(13)	(0.63)	(0.2)	(0.05)	(0.1)
	p.value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	Effect size (90%CI)	-1.67 (-1.85 to -1.49) ****	-1.11 (-1.28 to -0.94) ****	-1.59 (-1.76 to -1.41) ****	-1.33 (-1.50 to -1.15) ****	-0.39 (-0.55 to -0.24) ***	-0.82 (-0.98 to -0.66) ****	-0.37 (-0.52 to -0.21) ***	-0.66 (-0.82 to -0.50) ***
3 vs. 5 Days	Est.	1174	98	64	278	1.2	0.5	-0.13	2.0
	(SEE)	(145)	(34)	(11)	(28)	(1.3)	(0.4)	(0.11)	(0.3)
	p.value	<0.001	0.020	<0.001	<0.001	0.784	0.564	0.579	<0.001
	Effect size (90%CI)	-1.46 (-1.80 to -1.12) ****	-0.78 (-1.11 to -0.46) ***	-0.98 (-1.31 to -0.65) ****	-1.81 (-2.16 to -1.46) ****	-0.15 (-0.47 to 0.17)	-0.30 (-0.62 to 0.03)	0.23 (-0.09 to 0.55)	-1.07 (-1.40 to -0.74) ****
3 vs. 6 Days	Est.	1445	241	97	176	5.8	2.2	0.33	1.1
	(SEE)	(110)	(26)	(8)	(21)	(1.0)	(0.3)	(0.08)	(0.2)
	p.value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	Effect size (90%CI)	-1.71 (-1.99 to -1.44) ****	-1.61 (-1.88 to -1.34) ****	-0.83 (-1.00 to -0.67) ****	-1.10 (-1.36 to -0.84) ****	-0.69 (-0.94 to -0.44) ****	-1.24 (-1.50 to -0.98) ****	-0.44 (-0.69 to -0.19) ***	-0.56 (-0.80 to -0.31) ****
4 vs. 5 Days	Est.	-337	-129	-48	61	-2.0	-1.3	-0.38	0.8
	(SEE)	(144)	(34)	(11)	(28)	(1.3)	(0.4)	(0.11)	(0.3)
	p.value	0.083	<0.001	<0.001	0.110	0.377	0.002	0.002	0.027
	Effect size (90%CI)	0.29 (-0.03 to 0.61) *	0.49 (0.17 to 0.81) ***	0.66 (0.34 to 0.99) ****	-0.47 (-0.79 to -0.15) **	0.26 (-0.06 to 0.58)	0.52 (0.20 to 0.84) ***	0.68 (0.35 to 1.00) ***	-0.64 (-0.96 to -0.32) **
4 vs. 6 Days	Est.	-66	14	-15	-40	2.5	0.4	0.08	-0.1
	(SEE)	(110)	(26)	(8)	(21)	(1.0)	(0.3)	(0.08)	(0.2)
	p.value	0.927	0.942	0.287	0.208	0.049	0.374	0.773	0.963
	Effect size (90%CI)	0.10 (-0.14 to 0.35)	-0.05 (-0.29 to 0.20)	0.24 (-0.01 to 0.48) *	0.28 (0.03 to 0.52) *	-0.34 (-0.58 to -0.09) **	-0.17 (-0.42 to 0.07) *	-0.11 (-0.35 to 0.13)	0.08 (-0.16 to 0.33)
5 vs. 6 Days	Est.	271	143	33	-102	4.6	1.7	0.46	-1.0
	(SEE)	(168)	(40)	(13)	(32)	(1.5)	(0.4)	(0.12)	(0.4)
	p.value	0.352	0.002	0.041	0.008	0.012	<0.001	<0.001	0.033
	Effect size (90%CI)	-0.23 (-0.61 to 0.15) *	-0.65 (-1.03 to -0.26) ***	-0.48 (-0.86 to -0.10) **	1.01 (0.61 to 1.40) ***	-0.66 (-1.05 to -0.28) ***	-0.81 (-1.19 to -0.42) ****	-0.78 (-1.17 to -0.39) ***	0.91 (0.52 to 1.30) ***

Table 4

MD-1		Total Distance	High-Speed Distance	Accel'Rate	sRPE	Total Distance	High-Speed Distance	Accel'Rate	RPE
		(m)	(m)	(a.u)	(a.u)	(m.min ⁻¹)	(m.min ⁻¹)	(a.u)	(a.u)
3 vs. 4 Days	Est.	218	66	11	-57	2.8	0.8	0.14	-0.6
	(SEE)	(53)	(12)	(4)	(13)	(0.5)	(0.1)	(0.04)	(0.1)
	p.value	<0.001	<0.001	0.070	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Effect size (90%CI)	Effect size	-0.23	-0.45	-0.16	0.41	-0.35	-0.46	-0.24	0.39
	(90%CI)	(-0.39 to -0.07)	(-0.61 to -0.28)	(-0.32 to -0.00)	(0.24 to 0.57)	(-0.51 to -0.18)	(-0.62 to -0.30)	(-0.40 to -0.08)	(0.23 to 0.56)
		***		*	***				**
3 vs. 5 Days	Est.	406	-11	16	98	1.0	-0.3	-0.07	0.7
	(SEE)	(102)	(22)	(9)	(25)	(1.0)	(0.3)	(0.08)	(0.3)
	p.value	<0.001	0.955	0.210	<0.001	0.774	0.710	0.821	0.045
Effect size (90%CI)	Effect size	-0.62	0.10	-0.70	-0.69	-0.12	0.23	0.18	-0.46
	(90%CI)	(-0.93 to -0.30)	(-0.21 to 0.41)	(-0.89 to -0.52)	(-1.01 to -0.37)	(-0.44 to 0.19)	(-0.09 to 0.54)	(-0.14 to 0.49)	(-0.77 to -0.14)
		****			****				**
3 vs. 6 Days	Est.	135	100	16	-78	2.3	1.0	0.27	-0.8
	(SEE)	(98)	(22)	(8)	(24)	(1.0)	(0.3)	(0.08)	(0.2)
	p.value	0.499	<0.001	0.185	0.005	0.078	<0.001	0.003	0.004
Effect size (90%CI)	Effect size	-0.03	-0.68	-0.19	0.51	-0.24	-0.65	-0.43	0.50
	(90%CI)	(-0.33 to 0.27)	(-0.99 to -0.38)	(-0.50 to 0.11)	(0.21 to 0.82)	(-0.54 to 0.06)	(-0.96 to -0.35)	(-0.73 to -0.12)	(0.20 to 0.81)
		****	****	*	***	*	***	**	***
4 vs. 5 Days	Est.	188	-77	6	155	-1.8	-1.0	-0.20	1.3
	(SEE)	(105)	(23)	(9)	(26)	(1.0)	(0.3)	(0.08)	(0.3)
	p.value	0.264	0.004	0.912	<0.001	0.273	<0.001	0.062	<0.001
Effect size (90%CI)	Effect size	-0.37	0.50	-0.12	-1.25	0.22	0.60	0.46	-1.01
	(90%CI)	(-0.69 to -0.05)	(0.17 to 0.82)	(-0.44 to 0.21)	(-1.59 to -0.91)	(-0.10 to 0.54)	(0.27 to 0.92)	(0.14 to 0.79)	(-1.34 to -0.68)
		*	***		****	*	***	**	****
4 vs. 6 Days	Est.	-83	34	6	-21	-0.5	0.2	0.13	-0.2
	(SEE)	(101)	(22)	(8)	(24)	(1.0)	(0.3)	(0.08)	(0.3)
	p.value	0.832	0.393	0.906	0.811	0.958	0.755	0.322	0.772
Effect size (90%CI)	Effect size	0.18	-0.19	-0.04	0.16	0.12	-0.12	-0.23	0.17
	(90%CI)	(-0.13 to 0.49)	(-0.50 to 0.12)	(-0.35 to 0.27)	(-0.15 to 0.47)	(-0.19 to 0.43)	(-0.43 to 0.19)	(-0.54 to 0.08)	(-0.14 to 0.48)
			*					*	
5 vs. 6 Days	Est.	-271	111	-0.1	-177	1.4	1.3	0.34	-1.5
	(SEE)	(134)	(29)	(11)	(33)	(1.3)	(0.3)	(0.11)	(0.3)
	p.value	0.167	<0.001	1.000	<0.001	0.724	<0.001	0.007	<0.001
Effect size (90%CI)	Effect size	0.46	-0.64	0.07	1.13	-0.12	-0.81	-0.66	1.02
	(90%CI)	(0.04 to 0.88)	(-1.07 to -0.22)	(-0.35 to 0.48)	(0.69 to 1.58)	(-0.53 to 0.30)	(-1.25 to -0.38)	(-1.08 to -0.23)	(0.57 to 1.46)
		**	***		****		***	***	****

DISCUSSION GÉNÉRALE

Ce travail de thèse avait pour but de caractériser la CE en Handball par comparaison avec les situations de compétition chez des joueurs d'une équipe faisant partie de l'élite européenne. Un nouvel outil de mesure de l'activité des joueurs a été mis en place autour du terrain d'entraînement et de compétition du PSG Handball. Afin d'évaluer la pertinence de l'utilisation de ce système, notre premier axe de travail a été de vérifier la validité des données recueillies. Ceci nous a permis de déterminer que le système Kinexon™ présentait une validité satisfaisante afin de mesurer la position, la distance parcourue et la vitesse de déplacement des joueurs. À la suite de cette première étude nous avons investigué l'intensité maximale produite par les joueurs durant les matchs, en termes de distance parcourue, de DHV et de quantité de mouvement. Dans le cadre de cette seconde étude, nous avons également cherché à savoir dans quelle mesure les exercices traditionnels d'entraînements actuellement utilisés préparent les joueurs aux exigences de la compétition. Cette étude a démontré que les intensités maximales atteintes lors des matchs ne sont jamais reproduites durant les situations de jeux réduits les plus fréquemment employées lors des entraînements. À la suite de cette étude il nous a semblé important d'analyser la manière dont le rythme des matchs influençait la gestion de la CE. À ce titre, nous avons cherché à détailler l'organisation des entraînements au cours des journées précédant les matchs afin de comprendre dans quelle mesure les entraîneurs régulent et adaptent la CE des joueurs en fonction du rythme imposé par le calendrier sportif. Cependant, hormis une diminution de la CE en entraînement les lendemains de matchs, aucune autre régulation n'a pu être mise en évidence. Dans une première partie, nous discuterons des apports scientifiques issus de nos trois études, puis dans une seconde partie, nous évoquerons les limites associées à nos travaux. Enfin dans une troisième partie nous évoquerons des perspectives de recherche qui émanent de nos résultats.

Apports des travaux expérimentaux

Système de suivi instantané de la position : validation du Kinexon™

L'objectif de notre première étude était donc d'évaluer la validité du système LPS Kinexon™, au milieu et au bord du terrain. Afin de déterminer la précision des mesures effectuées par ce système, nous les avons comparées avec celles du système de capture de mouvement Vicon®.

Pour cela nous avons étudié trois types de mouvements, à savoir des sprints, des déplacements latéraux et des déplacements spécifiques au Handball. Cette analyse a permis de déterminer que la validité du système Kinexon™ peut être considérée comme acceptable pour mesurer les déplacements typiques des sports collectifs de salle et plus particulièrement du Handball. En effet, les mesures effectuées par le système Kinexon™ présentaient de fort coefficient de corrélation de Pearson avec celles du système de référence Vicon® (r entre $0,90 \pm 0,06$ et $1,00 \pm 0,00$ %) pour l'ensemble des variables, dans toutes les conditions testées et ce quel que soit le type de mouvement analysé, hormis pour trois cas particuliers. Ces derniers étaient tous associés à des mesures d'accélération et de (décélération) maximales lors des mouvements spécifiques au centre du terrain [r : $0,61 \pm 0,26$] et accélérations et décélérations maximales lors des sprints en bord de terrain [r : $0,25 \pm 0,33$ et $0,36 \pm 0,30$, respectivement]). À partir des résultats de cette étude il nous est possible de dire que le système Kinexon™ est au moins aussi valide que les différents systèmes GPS et LPS existants (Luteberget, et al. 2018b, Serpiello, et al. 2018, Vickery, et al. 2014, Waldron, et al. 2011). Nos indices de validité sont d'ailleurs équivalents ou supérieurs à ceux des autres systèmes de positionnements (GPS et LPS confondus) pour la mesure de la vitesse maximale atteinte, et ce, quelle que soit la position sur le terrain. Comme nous l'avons vu dans notre revue de littérature, la précision d'un système LPS est dépendante de sa capacité à mesurer correctement à la fois la position et la vitesse instantanée. Ici, nous avons pu vérifier la qualité de la mesure de la vitesse maximale. Or de nombreuses études ont montré une diminution de la précision des mesures de vitesse avec l'augmentation de cette dernière (Jennings, et al. 2010a, Petersen, et al. 2009). Ainsi, il semble logique d'inférer de nos résultats que la mesure de la vitesse par le système Kinexon™ est valide quelle que soit son intensité. De plus, la fiabilité des mesures de position du Vicon® ayant déjà été démontrée (Merriault, et al. 2017), l'analyse des signaux de position instantanée des systèmes Kinexon™ et Vicon®, dont les résultats sont présentés en Figure 29, démontre une excellente synchronisation et superposition, à la suite d'un filtrage similaire. Au regard de ce résultat, et de ceux concernant la mesure de la vitesse (TEE comprise entre 0.02 et 0.05, CV compris entre 0.3 et 2.1 %), il est possible d'inférer de la validité de la mesure de la position. En outre, pour obtenir la distance parcourue par les athlètes, les systèmes LPS et GPS dérivent les données instantanées de position. Puisque la position instantanée peut être considérée valide dans le cas du système Kinexon™, il n'est pas exagéré de considérer comme valide l'évaluation des distances parcourues. En effet, nous avons pu montrer que les mesures effectuées par ce

système sont similaire à celles effectuées par le Vicon®, qui est d'une précision de l'ordre du millimètre (Merriaux, et al. 2017). Les systèmes LPS, comme les GPS, n'ont pas besoin d'une telle précision pour mesurer les distances parcourues, c'est pourquoi nous pouvons affirmer que les données, globale et par palier de vitesse, fournies par le système Kinexon™ sont suffisamment fiables pour pouvoir être exploitées. Au vu des résultats de notre étude, il apparaît aussi que le système Kinexon™ est efficace pour la détection des événements d'accélération, de décélération et de changement de direction. Toutefois, lorsqu'il s'agit des valeurs maximales d'accélération et de décélération, la validité des mesures diminue. Cette problématique de la mesure des maximums atteints en accélération et décélération est commune à l'ensemble des systèmes GPS et LPS actuellement existant et est inhérente aux systèmes de mesure en ce qu'il nécessite une double dérivation du signal ce qui a pour effet d'augmenter les erreurs (Akenhead, et al. 2014, Stevens, et al. 2014). De plus, la validité de la mesure des décélérations dépend davantage que les autres variables (vitesse, distance total, etc...) de l'emplacement de la zone de mesure, notamment dans le cadre de mouvements complexes tels que ceux fréquemment utilisés dans le cadre de la pratique du Handball ou autres sports de salle, et analysés dans notre étude.

Organisation et structuration des entrainements de Handball

Les objectifs de notre seconde étude étaient d'une part de caractériser l'intensité locomotrice maximale des joueurs durant les compétitions, en fonction de leur poste, et d'autre part, d'évaluer si les jeux à format réduits utilisés en entrainement permettaient de reproduire ces intensités. Enfin, notre troisième et dernière étude avait pour but de proposer une description de la manière dont est actuellement gérée la CE des joueurs, en entrainement, selon le rythme des matchs.

Comparaison de l'activité en matchs selon les postes

Les principaux résultats de la seconde étude sont que l'intensité déployée pendant les matchs étaient modérément différentes entre les postes et que les ailiers présentaient la plus haute intensité. Cette étude suggère, au regard de la littérature antérieure, une modification de l'activité des joueurs en match, depuis le début des années 2000, engendrant notamment une augmentation de l'intensité déployée par les ailiers. Il semble, en effet, que les évolutions des règles du Handball, ayant eu pour but de dynamiser le jeu, ont engendré une augmentation du

nombre de courses à haute intensité, en particulier pour les ailiers, qui sont les premiers joueurs à mener les contre-attaques (Cardinale, et al. 2017, Luteberget, et al. 2018c, Machado, et al. 2021, Pori 2003, Wagner, et al. 2018, Wik, et al. 2017). De plus nous avons montré que les joueurs de la base arrière présentent l'intensité de jeu la plus faible (Figure 24), mais c'est aussi eux qui présentent le plus grand volume de jeu (Cardinale, et al. 2017, Luteberget, et al. 2018c, Machado, et al. 2021, Wagner, et al. 2018, Wik, et al. 2017). Les résultats obtenus concernant le poste de pivot nécessitent d'être mis en perspectives. En effet, il s'agit d'un poste qui ne présente pas une intensité significativement différente de celle des arrières mais dont le volume de jeu reste pourtant inférieur, certainement du fait du plus grand nombre de rotations effectuées par ces joueurs. Or, la diminution du volume de jeu devrait avoir pour effet d'augmenter l'intensité déployée, ce que nous n'observons pas. Le rôle du pivot, en tant qu'élément perturbateur se situant au cœur du dispositif défensif adverse implique que son activité soit globalement statique. Ceci implique que les variables en lien avec la distance parcourue peuvent ne pas être les plus pertinentes dans le cadre de l'analyse de leur activité (Cardinale, et al. 2017, Luteberget, et al. 2018c, Machado, et al. 2021, Wagner, et al. 2018, Wik, et al. 2017).

Comparaison des matchs et des entraînements

Nous avons ensuite comparé les intensités mesurées lors des matchs avec celles atteintes lors des situations de jeux réduits les plus fréquemment utilisées par l'équipe lors des entraînements. Notre recherche est, à notre connaissance, la première à avoir travaillé sur les intensités d'entraînement chez des Handballeur élites. Cela nous a permis de mettre en évidence que les intensités produites en compétition ne sont jamais reproduites en entraînement.

Périodisation de la charge d'entraînement

Dans le cadre de notre troisième et dernière étude nous avons pu mettre en évidence que la gestion de la CE en Handball ne présente que peu de régulation selon le nombre de jours disponibles entre deux matchs. Ces résultats sont différents de ceux observés en Football ou Rugby pour lesquels une modification du temps disponible entre deux matchs entraîne une modification de l'organisation des entraînements (Anderson, et al. 2016, Oliveira, et al. 2019, Stevens, et al. 2017). En effet, les études portant sur ces sports ont mis en évidence une réduction du volume et de l'intensité de travail en cas de raccourcissement du délai entre deux matchs et au contraire une augmentation, notamment 72h avant le match, en cas d'allongement

de ce délai. Toutefois, il n'est pas surprenant d'obtenir ce résultat dans le Handball au regard de l'absence de reproduction des intensités de matchs en entraînements, observés lors de notre précédente étude. L'unique adaptation que nous avons pu rapporter concerne les lendemains de matchs qui présentent une diminution conséquente de la CE. Ce dernier résultat est cohérent avec ce qui a pu être mis en évidence dans d'autres sports avec une réduction significative à la fois du volume et de l'intensité lors de l'entraînement du lendemain du match (Anderson, et al. 2016, Oliveira, et al. 2019). D'ailleurs cela est adapté au regard des principes physiologiques de l'entraînement tels que nous les avons présentés lors de notre revue de littérature. En effet, le lendemain du match, généralement joué en fin d'après-midi ou dans la soirée, correspond à la phase de réaction d'alarme et est donc associée à une diminution de la capacité physique. De ce fait les lendemains de matchs sont toujours organisés pour permettre aux joueurs de récupérer. Cependant, au regard des exigences du calendrier, il est parfois nécessaire de proposer une séance de travail spécifique, qui sera alors allégée en termes de volume et d'intensité. Par ailleurs, le fait que le niveau d'intensité des matchs ne soit pas atteint durant les entraînements les 3 jours précédant le match signifie que les entraîneurs privilégient la récupération des joueurs au maintien ou développement de leurs capacités. Ainsi, lorsque le calendrier s'allège, les exigences d'entraînement ne sont pas réévaluées pour tendre vers celles de match afin de ne pas induire de fatigue supplémentaire chez les joueurs (Dello Iacono, et al. 2017, Dello Iacono, et al. 2018). Il est tout de même nécessaire de préciser que nos analyses n'ont porté que sur l'activité sur le terrain, or l'activité en musculation, qui n'a pas été mesurée dans le cadre de ce travail de recherche, est une solution pour introduire des entraînements de haute intensité tout en excluant les effets délétères des contacts inhérents à la pratique du Handball (Dello Iacono, et al. 2017, Dello Iacono, et al. 2018). Ces entraînements de sessions physiques spécifiques, tels que des courses intermittentes, permettent d'induire de haute dépense énergétique similaire à celles effectuées en matchs sans pour autant ajouter les traumatismes liés aux contacts inhérents à la pratique de sport comme le Handball ou le Rugby (Buchheit, et al. 2018, Coito, et al. 2022, Gabbett 2002, Gamble 2004, Lacomme 2013, Lacomme, et al. 2014, Scanlan, et al. 2014). Une autre solution serait d'envisager l'utilisations de jeux réduits interdisant l'utilisation du haut du corps pour les contacts physiques D'autre part, le fait que les veilles de matchs présentent une intensité et un volume de travail constant quel que soit le délai disponible entre deux matchs implique que l'entraînement de veille de match est

organisé comme une routine de préparation des matchs. Cela permet de proposer un travail physique adapté et de procéder aux derniers ajustement technique et tactique.

Limites et considérations méthodologiques

Système de suivi instantané de la position : Kinexon™

La principale limite associée à notre première étude provient du fait qu'elle s'appuie sur une configuration unique et non reproductible à l'identique du système Kinexon™ étudié. En effet, celui-ci sera toujours calibré par la société fournissant le système aux différents utilisateurs dans la configuration la plus favorable selon le site d'installation. Cela implique donc de possibles différences de capacité du système, dépendant, entre autres, de la configuration des lieux. En effet, nous pouvons noter que, dans notre configuration spécifique avec certaines antennes disposées à 1m du terrain, nous avons obtenu des résultats meilleurs que ce qui a pu être mis en évidence dans des études antérieures. Toutefois, nos résultats présentent encore des erreurs, en particulier près des antennes pour les mesures d'accélération et de décélération maximales. Ainsi la problématique de disposition des antennes autour du terrain, que nous avons souligné dans notre étude, peut ne pas se retrouver dans d'autres configurations.

Organisation et structuration des entrainements de Handball

À la suite de nos études portant sur l'activité Handball, nous pouvons mentionner quelques limites supplémentaires, au-delà de l'analyse des données fournies par l'outil.

Tout d'abord ces études ne portent que sur une seule équipe, et uniquement certains joueurs de l'équipe, en raison des conditions d'inclusion dans les études, telles que le poste et le temps de jeu effectif en match (16 joueurs testés dont 11 dans le cas l'étude 2). De ce fait il est possible que nos résultats ne soient représentatifs que de l'équipe étudiée et du style d'entraînement proposé par l'unique entraîneur ayant travaillé avec l'équipe durant toute la durée de la thèse. Des résultats différents auraient pu être observés avec d'autres équipes utilisant des systèmes tactiques différents et une organisation des entrainements différentes. Par conséquent, il convient de faire preuve de prudence quant à la généralisation de ces résultats à d'autres contextes. De plus, seuls les matchs et entrainements à domicile sur une saison et demie ont pu être étudiés du fait de l'installation à demeure de notre système Kinexon™. Il est donc possible

qu'avec une durée d'analyse plus longue, et donc un plus grand nombre de matchs et d'entraînements étudiés, les résultats auraient été différents. Par ailleurs, l'analyse des matchs à l'extérieur pourrait aussi amener à nuancer nos résultats (Oliveira, et al. 2021). En effet, lors des longs déplacements des entraînements ont lieu, notamment les veilles de matchs. Or avec les contraintes d'organisation des trajets il est possible que ces entraînements présentent des différences en termes de volume et d'intensité de travail. En outre, dans le cadre de notre seconde étude de thèse, seuls trois types de SSGs ont été analysés, du fait des choix de l'entraîneur qui dans le cadre de ses projets de jeu n'en a pas proposé d'autres. Or il a été prouvé que les formats des jeux réduits (i.e., taille du terrain, nombre de joueurs, règles utilisées, inclusion ou non de contacts) peuvent influencer l'intensité déployée (Clemente, et al. 2014, Halouani, et al. 2014, Lacombe, et al. 2018b). De ce fait, les résultats obtenus pourraient être différents avec d'autres configurations d'entraînements. Enfin, la spécificité de la CE imposée par les différents postes peut être plus ou moins bien prise en compte par les outils actuels. Ainsi, les pivots en Handball ne présentant que peu d'événements car leur activité reste majoritairement quasi isométrique et donc difficilement mesurable, ont une mesure de CE certainement inférieure à la réalité de leur production sur le terrain. A l'inverse, les ailiers qui produisent beaucoup de courses à haute intensité et d'évènements remarquables par les technologies actuelles ont une CE certainement très représentative de leurs efforts sur le terrain. Cette dichotomie implique donc la nécessité de construire des outils plus à même de mesurer la CE neuromusculaire interne en activité ce qui permettrait aussi d'estimer de manière plus pertinente les efforts quasi isométriques tels que ceux produits par les pivots.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET APPLICATIONS PRATIQUES

À travers notre travail de recherche nous avons pour but de participer à l'optimisation de la CE en Handball à partir de comparaisons avec les situations de compétition. Pour cela il nous a fallu commencer par valider le système de mesure de l'activité utilisé durant cette thèse. Ainsi nous avons pu mettre en évidence dans la première étude que le système Kinexon™ est suffisamment performant pour mesurer l'activité des joueurs de Handball. Nous avons ainsi pu utiliser cet outil pour nos mesures liées à la CE quotidiens et de match bihebdomadaires chez nos joueurs élites. De nos trois études présentées dans ce travail de thèse nous pouvons extraire différentes applications pratiques.

Système de suivi instantané de la position : Kinexon™

- La validité des données du système Kinexon™ pour mesurer les exigences du Handball à la fois en termes de vitesse, d'accélération et de décélération maximales est acceptable.
- L'outil offre la possibilité d'affiner l'analyse de l'activité Handball en entraînement et en compétition en ajoutant aux paramètres traditionnels de temps et de mouvement (respectivement, temps passé et distance parcourue dans des zones de vitesse) les données concernant le nombre d'accélérations / décélérations ou le temps passé dans des zones d'accélération / décélération (Delaney, et al. 2015, Lacome, et al. 2014, Michalsik, et al. 2015, Stevens, et al. 2014).
- Certaines données doivent être traitées avec précaution par les praticiens, comme les pics d'accélération et de décélération des ailiers, dont le niveau de précision s'est avéré être parcellaire.

Organisation et structuration des entrainements de Handball

- Le poste d'ailier est le plus exigeant en termes d'intensité maximale de déplacements ce qui implique un besoin de préparation physique spécifique mettant l'accent sur les courses à haute intensité.
- L'utilisation des mesures associées aux distances parcourues ne permettent d'établir qu'approximativement l'intensité déployée en match par les joueurs de Handball, notamment dans le cas des pivots dont l'activité peut être statique (Cardinale, et al. 2017, Karcher and Buchheit 2014, Póvoas 2014).
- Puisque les exigences de matchs ne sont jamais reproduites durant les entrainements, nous notons l'importance, dès lors que les conditions peuvent être réunies, de mettre en place des exercices isolés (musculature, course) de haute intensité, ou bien des jeux réduits interdisant les contacts. Cela permet aux joueurs de récupérer de la fatigue spécifique induite par les contacts mais aussi de maintenir, voire d'élever, leur niveau de performance (Buchheit 2014, Buchheit and Laursen 2013, Dello Iacono, et al. 2017, Dello Iacono, et al. 2018, Kunz, et al. 2019).

PERSPECTIVES DE RECHERCHES

Pour finir nous souhaiterions proposer plusieurs perspectives de recherche pouvant être menées à la suite de notre projet et permettant d'approfondir les connaissances sur l'activité Handball notamment en matière d'optimisation des entraînements.

Organisation et structuration des entraînements de Handball

Une des perspectives à court termes pourrait être de s'interroger sur les liens pouvant exister entre le modèle de périodisation et la performance physique en match. En effet, puisque nous avons pu établir des adaptations dans les volumes et les intensités des entraînements, il est nécessaire de s'interroger sur l'impact de ces régulations sur la capacité des joueurs à performer. Pour cela la première étape consisterait à s'interroger sur l'évolution des performances des joueurs en match au cours de la saison afin d'établir si les effets traditionnellement mesurés de l'enchaînement des matchs, induisant une dégradation des performances physiques, se retrouvent dans le contexte du Handball. Au-delà de l'impact sur les performances physiques des joueurs, il est pertinent d'approfondir la question de la relation de causalité entre l'état de forme des joueurs et le modèle de périodisation mis en place, car cela permettrait d'envisager des pistes d'optimisation de la préparation des joueurs pour leur permettre d'être le plus performant possible tout au long de la saison. Il serait alors intéressant d'associer cette analyse à une étude de la périodisation de la CE mise en place, en Handball, à l'échelle du macrocycle de la saison. En effet, après avoir établi, lors de notre troisième étude, la gestion de la CE mise en place au cours des microcycle (durée disponible entre deux matchs), cette analyse permettrait de mieux comprendre les adaptations et régulations mise en place au cours de ce macrocycle et d'engager la réflexion sur les possibilités d'optimisation disponible, comme cela a pu être fait dans d'autres sports, notamment le Football (Malone, et al. 2015). En effet, bien que très descriptives, ces études sont les bases nécessaires à la discussion des organisations mise en place lors des différents cycles. Ainsi décrire les fonctionnements actuels offrirait l'opportunité de pouvoir les questionner et ainsi envisager de les optimiser. Au travers de l'optimisation de ces cycles de travail il serait alors possible d'agir sur la capacité de performer des joueurs ainsi que sur leur risque de blessure (Fox, et al. 2018, Gabbett and Domrow 2007, Gabbett and Jenkins 2011), qui sont les deux principaux objectifs des encadrements des équipes professionnelles de tout sport.

Une seconde perspective de travail, toujours dans le but d'optimiser la préparation des handballeurs aux exigences de la compétition, serait d'approfondir l'apport relatif des données de CEi et de CEe dans la mesure globale de la CE. L'objectif serait alors de comprendre dans quelle mesure il est pertinent de mesurer simultanément l'ensemble des variables, mais aussi les liens pouvant exister entre certaines d'entre elles et leur corrélation avec l'état de forme et la fatigue des joueurs (Buchheit, et al. 2018, Impellizzeri, et al. 2019, McLaren, et al. 2018). En effet, il a été démontré, notamment dans le Football, que certaines variables présentaient plus d'intérêt que d'autre pour mesurer l'état de forme des joueurs (Bartlett, et al. 2017, Lacombe, et al. 2018a). De plus, il a été mis en évidence que des relations pouvaient être établies entre différentes variables, en particulier avec la sRPE, mais que cela ne pouvait pas être généralisé en raison de dépendance au profil des joueurs (Akenhead and Nassis 2016).

Enfin, la dernière perspective que nous proposerons est relative à l'amélioration du suivi des capacités physiques des joueurs permettant d'optimiser le travail des préparateurs physiques. En effet, pour permettre l'optimisation de la périodisation il est nécessaire de disposer de marqueurs régulièrement mesurés pour établir un diagnostic de l'état de forme instantané des joueurs. C'est d'ailleurs l'identification de ces marqueurs qui reste, aujourd'hui encore, problématique. Un marqueur régulièrement utilisé en sport collectif est le profil force-vitesse des joueurs, mais celui est difficilement reproductible au cours de la saison du fait de la lourdeur des protocoles nécessaire à leur mesure. C'est pourquoi ce profil est actuellement défini individuellement en début de saison sportive pour établir les programmes de présaison, mais il n'est ensuite que très partiellement, voire pas du tout, utilisé au cours de la saison. Néanmoins, il reste l'un des principaux indicateurs de l'état de forme des joueurs à disposition des préparateurs physiques. Les travaux de Morin et al. (2021), en présentant une nouvelle manière de mesurer ce profil à partir des données GPS, permettent d'envisager une réelle révolution dans la gestion de la CE, en ouvrant l'opportunité d'effectuer un suivi quotidien de ce profil force vitesse. En effet, cela offrirait la possibilité d'utiliser un marqueur fiable pour le suivi des capacités physiques des joueurs tout au long de la saison. Cette méthodologie, approuvée en Football, nécessiterait d'être questionnée en Handball, à l'aide de l'outil LPS, car si cela se vérifiait également dans ce sport, il serait possible d'assister à une révolution dans la manière de réguler la CE et les programmes d'entraînement dans ce sport.

BIBLIOGRAPHIE

1. C. R. Abbiss and P. B. Laursen, *Describing and Understanding Pacing Strategies During Athletic Competition*. Sports Medicine, 2008. **38**(3): p. 239-52.
2. N. B. Abdelkrim, S. El Fazaa and J. El Ati, *Time–Motion Analysis and Physiological Data of Elite under-19-Year-Old Basketball Players During Competition*. British journal of Sports Medicine, 2007. **41**(2): p. 69-75.
3. Y. Adesida, E. Papi and A. H. McGregor, *Exploring the Role of Wearable Technology in Sport Kinematics and Kinetics: A Systematic Review*. Sensors (Basel), 2019. **19**(7).
4. R. Akenhead, et al., *The Acceleration Dependent Validity and Reliability of 10 Hz Gps*. Journal of Science and Medicine in Sport, 2014. **17**(5): p. 562-6.
5. R. Akenhead, J. A. Harley and S. P. Tweddle, *Examining the External Training Load of an English Premier League Football Team with Special Reference to Acceleration*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2016. **30**(9): p. 2424-32.
6. R. Akenhead and G. P. Nassis, *Training Load and Player Monitoring in High-Level Football: Current Practice and Perceptions*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2016. **11**(5): p. 587-93.
7. A. Al-Lail, *A Motion Analysis of the Work-Rate & Heart Rate of the Elite Kuwaiti Handball Players*. Retrieved, 2001. **18**(4): p. 2001.
8. L. Anderson, et al., *Quantification of Training Load During One-, Two- and Three-Game Week Schedules in Professional Soccer Players from the English Premier League: Implications for Carbohydrate Periodisation*. Journal of Sports Sciences, 2016. **34**(13): p. 1250-9.
9. M. S. Aoki, et al., *Monitoring Training Loads in Professional Basketball Players Engaged in a Periodized Training Program*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2017. **31**(2): p. 348-358.
10. A. L. Arcos, et al., *Rating of Muscular and Respiratory Perceived Exertion in Professional Soccer Players*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2014. **28**(11): p. 3280-8.
11. R. J. Aughey, *Applications of Gps Technologies to Field Sports*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2011a. **6**(3): p. 295-310.
12. R. J. Aughey, *Increased High-Intensity Activity in Elite Australian Football Finals Matches*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2011b. **6**(3): p. 367-79.
13. D. Austin, T. Gabbett and D. Jenkins, *The Physical Demands of Super 14 Rugby Union*. Journal of Science and Medicine in Sport, 2011. **14**(3): p. 259-63.
14. D. J. Austin and S. J. Kelly, *Positional Differences in Professional Rugby League Match Play through the Use of Global Positioning Systems*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2013. **27**(1): p. 14-19.

15. J. Bangsbo, L. Norregaard and F. Thorso, *Activity Profile of Competition Soccer*. Canadian Journal of Sport Sciences, 1991. **16**(2): p. 110-6.
16. E. W. Banister and T. W. Calvert, *Planning for Future Performance: Implications for Long Term Training*. Canadian journal of applied sport sciences, 1980. **5**(3): p. 170-6.
17. E. W. Banister and C. L. Hamilton, *Variations in Iron Status with Fatigue Modelled from Training in Female Distance Runners*. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 1985. **54**(1): p. 16-23.
18. S. Barrett, A. Midgley and R. Lovell, *Playerload: Reliability, Convergent Validity, and Influence of Unit Position During Treadmill Running*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2014. **9**(6): p. 945-52.
19. S. Barrett, et al., *The within-Match Patterns of Locomotor Efficiency During Professional Soccer Match Play: Implications for Injury Risk?* Journal of Science and Medicine in Sport, 2016a. **19**(10): p. 810-5.
20. S. Barrett, et al., *Within-Match Playerload Patterns During a Simulated Soccer Match: Potential Implications for Unit Positioning and Fatigue Management*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2016b. **11**(1): p. 135-40.
21. S. Barris and C. Button, *A Review of Vision-Based Motion Analysis in Sport*. Sports Medicine, 2008. **38**(12): p. 1025-43.
22. J. D. Bartlett, et al., *Relationships between Internal and External Training Load in Team-Sport Athletes: Evidence for an Individualized Approach*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2017. **12**(2): p. 230-234.
23. D. S. Bassett, et al., *Learning-Induced Autonomy of Sensorimotor Systems*. Nature Neuroscience, 2015. **18**(5): p. 744-51.
24. A. Bastida-Castillo, et al., *Comparing Accuracy between Global Positioning Systems and Ultra-Wideband-Based Position Tracking Systems Used for Tactical Analyses in Soccer*. European Journal of Sport Science, 2019. **19**(9): p. 1157-1165.
25. A. Bastida Castillo, et al., *Accuracy, Intra- and Inter-Unit Reliability, and Comparison between Gps and Uwb-Based Position-Tracking Systems Used for Time-Motion Analyses in Soccer*. European Journal of Sport Science, 2018. **18**(4): p. 450-457.
26. M. Beato, G. Devereux and A. Stiff, *Validity and Reliability of Global Positioning System Units (Statsports Viper) for Measuring Distance and Peak Speed in Sports*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2018. **32**(10): p. 2831-2837.
27. J. Belka, et al., *Effects of Environmental Context on Physiological Response During Team Handball Small Sided Games*. International Journal of Exercise Science, 2017. **10**(8): p. 1263-1274.
28. P. Blauburger, R. Marzilger and M. Lames, *Validation of Player and Ball Tracking with a Local Positioning System*. Sensors (Basel), 2021. **21**(4): p. 1465.

29. M. Bon. (2001). *Quantified Evaluation of Loading and Monitoring of Heart Rate of Handball Players in a Match*. University of Ljubljana, Slovenia. In Slovenian: English abstract.
30. E. Borg and G. Borg, *A Comparison of Ame and Cr100 for Scaling Perceived Exertion*. *Acta Psychologica (Amst)*, 2002. **109**(2): p. 157-75.
31. G. Borg, P. Hassmen and M. Lagerstrom, *Perceived Exertion Related to Heart Rate and Blood Lactate During Arm and Leg Exercise*. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1987. **56**(6): p. 679-85.
32. J. Borresen and M. I. Lambert, *The Quantification of Training Load, the Training Response and the Effect on Performance*. *Sports Medicine*, 2009. **39**(9): p. 779-95.
33. P. C. Bourdon, et al., *Monitoring Athlete Training Loads: Consensus Statement*. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2017. **12**(Suppl 2): p. S2161-S2170.
34. L. Bowen, et al., *Accumulated Workloads and the Acute:Chronic Workload Ratio Relate to Injury Risk in Elite Youth Football Players*. *British Journal of Sports Medicine*, 2017. **51**(5): p. 452-459.
35. L. J. Boyd, K. Ball and R. J. Aughey, *Quantifying External Load in Australian Football Matches and Training Using Accelerometers*. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2013. **8**(1): p. 44-51.
36. P. S. Bradley, et al., *The Effect of Playing Formation on High-Intensity Running and Technical Profiles in English Fa Premier League Soccer Matches*. *Journal of Sports Sciences*, 2011. **29**(8): p. 821-30.
37. S. Bredt, et al., *Understanding Player Load: Meanings and Limitations*. *Journal of Human Kinetics*, 2020. **71**(1): p. 5-9.
38. M. Buchheit, *Programming High-Intensity Training in Handball*. *ASPETAR Sports Medicine Journal*, 2014. **3**.
39. M. Buchheit, *Chasing the 0.2*. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2016. **11**(4): p. 417-8.
40. M. Buchheit, A. Gray and J. B. Morin, *Assessing Stride Variables and Vertical Stiffness with Gps-Embedded Accelerometers: Preliminary Insights for the Monitoring of Neuromuscular Fatigue on the Field*. *Journal of Sports Sciences Med*, 2015. **14**(4): p. 698-701.
41. M. Buchheit, et al., *Neuromuscular Responses to Conditioned Soccer Sessions Assessed Via Gps-Embedded Accelerometers: Insights into Tactical Periodization*. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2018. **13**(5): p. 577-583.
42. M. Buchheit and P. B. Laursen, *High-Intensity Interval Training, Solutions to the Programming Puzzle*. *Sports medicine*, 2013. **43**(10): p. 927-954.
43. M. Buchheit, et al., *Game-Based Training in Young Elite Handball Players*. *International Journal of Sports Medicine*, 2009a. **30**(4): p. 251-8.

44. M. Buchheit, et al., *Cardiorespiratory Responses During Running and Sport-Specific Exercises in Handball Players*. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2009b. **12**(3): p. 399-405.
45. M. Buchheit and B. M. Simpson, *Player-Tracking Technology: Half-Full or Half-Empty Glass?* *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2017. **12**(Suppl 2): p. S235-S241.
46. N. F. Butte, U. Ekelund and K. R. Westerterp, *Assessing Physical Activity Using Wearable Monitors: Measures of Physical Activity*. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2012. **44**(1S): p. S5-S12.
47. F. Campos de Souza, et al., *Hiit Models in Addition to Training Load and Heart Rate Variability Are Related with Physiological and Performance Adaptations after 10-Weeks of Training in Young Futsal Players*. *Frontiers in Psychology*, 2021. **12**.
48. W. B. Cannon, *The Wisdom of the Body*. 1939.
49. M. Cardinale, et al., *Activity Profiles and Positional Differences of Handball Players During the World Championships in Qatar 2015*. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2017. **12**(7): p. 908-915.
50. C. Carling, *Interpreting Physical Performance in Professional Soccer Match-Play: Should We Be More Pragmatic in Our Approach?* *Sports Medicine*, 2013. **43**(8): p. 655-63.
51. C. Carling and G. Dupont, *Are Declines in Physical Performance Associated with a Reduction in Skill-Related Performance During Professional Soccer Match-Play?* *Journal of Sports Sciences*, 2011. **29**(1): p. 63-71.
52. N. R. Carlson, W. Buskist and G. N. Martin, *Psychology: The Science of Behavior*. 1997.
53. D. Carrilho, et al., *Using Optical Tracking System Data to Measure Team Synergic Behavior: Synchronization of Player-Ball-Goal Angles in a Football Match*. *Sensors (Basel)*, 2020. **20**(17).
54. D. Casamichana, J. Castellano and C. Castagna, *Comparing the Physical Demands of Friendly Matches and Small-Sided Games in Semiprofessional Soccer Players*. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 2012. **26**(3): p. 837-43.
55. J. Castellano, D. Alvarez-Pastor and P. S. Bradley, *Evaluation of Research Using Computerised Tracking Systems (Amisco and Prozone) to Analyse Physical Performance in Elite Soccer: A Systematic Review*. *Sports Medicine*, 2014. **44**(5): p. 701-12.
56. G. A. Cavagna, *Force Platforms as Ergometers*. *Journal of applied physiology*, 1975. **39**(1): p. 174-179.
57. M. S. Chelly, et al., *Match Analysis of Elite Adolescent Team Handball Players*. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 2011. **25**(9): p. 2410-7.
58. K. Y. Chen and D. R. Bassett, Jr., *The Technology of Accelerometry-Based Activity Monitors: Current and Future*. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2005. **37**(11 Suppl): p. S490-500.
59. K. Y. Chen, et al., *Re-Defining the Roles of Sensors in Objective Physical Activity Monitoring*. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2012. **44**(1 Suppl 1): p. S13.

60. L. Chiari, et al., *Human Movement Analysis Using Stereophotogrammetry. Part 2: Instrumental Errors*. *Gait & Posture*, 2005. **21**(2): p. 197-211.
61. F. M. Clemente, et al., *Effects of Mental Fatigue in Total Running Distance and Tactical Behavior During Small-Sided Games: A Systematic Review with a Meta-Analysis in Youth and Young Adult's Soccer Players*. *Frontiers in Psychology*, 2021a. **12**: p. 656445.
62. F. M. Clemente, et al., *Accelerometry-Workload Indices Concerning Different Levels of Participation During Congested Fixture Periods in Professional Soccer: A Pilot Study Conducted over a Full Season*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021b. **18**(3): p. 1137.
63. F. M. Clemente, et al., *Acute Effects of the Number of Players and Scoring Method on Physiological, Physical, and Technical Performance in Small-Sided Soccer Games*. *Research in Sports Medicine*, 2014. **22**(4): p. 380-97.
64. N. Coito, et al., *Capturing and Quantifying Tactical Behaviors in Small-Sided and Conditioned Games in Soccer: A Systematic Review*. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 2022. **93**(1): p. 189-203.
65. M. J. Colby, et al., *Accelerometer and Gps-Derived Running Loads and Injury Risk in Elite Australian Footballers*. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 2014. **28**(8): p. 2244-52.
66. D. Conte, et al., *Workload and Well-Being across Games Played on Consecutive Days During in-Season Phase in Basketball Players*. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 2021. **61**(4): p. 534-541.
67. K. Corder, et al., *Assessment of Physical Activity in Youth*. *Journal of Applied Physiology* (1985), 2008. **105**(3): p. 977-87.
68. S. J. Cormack, et al., *Accelerometer Load as a Measure of Activity Profile in Different Standards of Netball Match Play*. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2014. **9**(2): p. 283-91.
69. M. Corvino, et al., *Effect of Court Dimensions on Players' External and Internal Load During Small-Sided Handball Games*. *Journal of Sports Science and Medicine*, 2014. **13**(2): p. 297-303.
70. A. Couderc, et al., *Repeated High-Intensity Effort Activity in International Male Rugby Sevens*. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 2019.
71. A. Coutts, et al., *Changes in Selected Biochemical, Muscular Strength, Power, and Endurance Measures During Deliberate Overreaching and Tapering in Rugby League Players*. *International Journal of Sports Medicine*, 2007a. **28**(2): p. 116-24.
72. A. J. Coutts and R. Duffield, *Validity and Reliability of Gps Devices for Measuring Movement Demands of Team Sports*. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2010. **13**(1): p. 133-5.
73. A. J. Coutts, et al., *Monitoring for Overreaching in Rugby League Players*. *European Journal of Applied Physiology*, 2007b. **99**(3): p. 313-24.
74. Z. L. Crang, et al., *The Validity and Reliability of Wearable Microtechnology for Intermittent Team Sports: A Systematic Review*. *Sports Medicine*, 2021. **51**(3): p. 549-565.

75. C. Cummins, et al., *Global Positioning Systems (Gps) and Microtechnology Sensors in Team Sports: A Systematic Review*. Sports Medicine, 2013. **43**(10): p. 1025-42.
76. B. Cunniffe, et al., *An Evaluation of the Physiological Demands of Elite Rugby Union Using Global Positioning System Tracking Software*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2009. **23**(4): p. 1195-1203.
77. N. E. Dalton-Barron, et al., *Identifying Contextual Influences on Training Load: An Example in Professional Rugby Union*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2018. **10**.
78. M. J. Davies, et al., *Comparison of Agility Demands of Small-Sided Games in Elite Australian Football*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2013. **8**(2): p. 139-47.
79. B. Dawson, et al., *Player Movement Patterns and Game Activities in the Australian Football League*. Journal of Science and Medicine in Sport, 2004. **7**(3): p. 278-91.
80. P. B. Debien, et al., *Monitoring Training Load, Recovery, and Performance of Brazilian Professional Volleyball Players During a Season*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2018. **13**(9): p. 1182-1189.
81. P. Delamarche, et al., *Extent of Lactic Anaerobic Metabolism in Handballers*. International Journal of Sports Medicine, 1987. **8**(1): p. 55-9.
82. J. A. Delaney, et al., *Establishing Duration-Specific Running Intensities from Match-Play Analysis in Rugby League*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2015. **10**(6): p. 725-31.
83. J. A. Delaney, et al., *Peak Running Intensity of International Rugby: Implications for Training Prescription*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2017a. **12**(8): p. 1039-1045.
84. J. A. Delaney, et al., *Modelling the Decrement in Running Intensity within Professional Soccer Players*. Science and Medicine in Football, 2017b. **2**(2): p. 86-92.
85. J. Delgado-Bordonau and A. Mendez-Villanueva, *The Tactical Periodization Model*. Fitness in Soccer: The Science and Practical Application. Moveo Ergo Sum, 2014.
86. A. Dellal, et al., *Heart Rate Responses During Small-Sided Games and Short Intermittent Running Training in Elite Soccer Players: A Comparative Study*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2008. **22**(5): p. 1449-57.
87. A. Dellal, et al., *The Effects of a Congested Fixture Period on Physical Performance, Technical Activity and Injury Rate During Matches in a Professional Soccer Team*. British Journal of Sports Medicine, 2015. **49**(6): p. 390-4.
88. A. Dello Iacono, et al., *Effect of Small-Sided Games and Repeated Shuffle Sprint Training on Physical Performance in Elite Handball Players*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2016. **30**(3): p. 830-40.
89. A. Dello Iacono, et al., *Neuromuscular and Inflammatory Responses to Handball Small-Sided Games: The Effects of Physical Contact*. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 2017. **27**(10): p. 1122-1129.

90. A. Dello Iacono, et al., *Effect of Contact and No-Contact Small-Sided Games on Elite Handball Players*. Journal of Sports Sciences, 2018. **36**(1): p. 14-22.
91. A. Dello Iacono, et al., *Beneficial Effects of Small-Sided Games as a Conclusive Part of Warm-up Routines in Young Elite Handball Players*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2021. **35**(6): p. 1724-1731.
92. M. Di Mascio and P. S. Bradley, *Evaluation of the Most Intense High-Intensity Running Period in English Fa Premier League Soccer Matches*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2013. **27**(4): p. 909-15.
93. L. Djaoui, et al., *Physical Activity During a Prolonged Congested Period in a Top-Class European Football Team*. Asian Journal of Sports Medicine, 2014. **5**(1): p. 47-53.
94. E. Dott, *Analyse Qualitative Et Quantitative Des Actions Motrices En Handball*. France: Master Thesis, Strasbourg Sports Science University, 2002.
95. R. Dubois, et al., *Influence of Weekly Workload on Physical, Biochemical and Psychological Characteristics in Professional Rugby Union Players over a Competitive Season*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2020. **34**(2): p. 527-545.
96. S. Duhig, et al., *Effect of High-Speed Running on Hamstring Strain Injury Risk*. British Journal of Sports Medicine, 2016. **50**(24): p. 1536-1540.
97. G. Dupont, et al., *Effect of 2 Soccer Matches in a Week on Physical Performance and Injury Rate*. The American Journal of Sports Medicine, 2010. **38**(9): p. 1752-8.
98. S. Edwards, *High Performance Training and Racing*. The heart rate monitor book, 1993. **12**(2): p. 113-123.
99. F. E. Ehrmann, et al., *Gps and Injury Prevention in Professional Soccer*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2016. **30**(2): p. 360-7.
100. M. Elloumi, et al., *Igfbp-3, a Sensitive Marker of Physical Training and Overtraining*. British Journal of Sports Medicine, 2005. **39**(9): p. 604-10.
101. H. Folgado, et al., *The Effects of Congested Fixtures Period on Tactical and Physical Performance in Elite Football*. Journal of Sports Sciences, 2015. **33**(12): p. 1238-47.
102. C. Foster, et al., *A New Approach to Monitoring Exercise Training*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2001. **15**(1): p. 109-15.
103. C. Foster, et al., *Effects of Specific Versus Cross-Training on Running Performance*. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 1995. **70**(4): p. 367-72.
104. C. Foster, et al., *Pacing Strategy and Athletic Performance*. Sports Medicine, 1994. **17**(2): p. 77-85.
105. C. D. Foster, et al., *Heart Rate Responses to Small-Sided Games among Elite Junior Rugby League Players*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2010. **24**(4): p. 906-11.

106. J. L. Fox, et al., *The Association between Training Load and Performance in Team Sports: A Systematic Review*. Sports Medicine, 2018. **48**(12): p. 2743-2774.
107. T. T. Freitas, et al., *Effects of a Congested Fixture Period on Speed and Power Performance of Elite Young Soccer Players*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2021. **1**(aop): p. 1-7.
108. N. Furlan, et al., *Running-Intensity Fluctuations in Elite Rugby Sevens Performance*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2015. **10**(6): p. 802-7.
109. T. J. Gabbett, *Training Injuries in Rugby League: An Evaluation of Skill-Based Conditioning Games*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2002. **16**(2): p. 236-41.
110. T. J. Gabbett, *Gps Analysis of Elite Women's Field Hockey Training and Competition*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2010. **24**(5): p. 1321-4.
111. T. J. Gabbett and N. Domrow, *Relationships between Training Load, Injury, and Fitness in Sub-Elite Collision Sport Athletes*. Journal of Sports Sciences, 2007. **25**(13): p. 1507-1519.
112. T. J. Gabbett and D. G. Jenkins, *Relationship between Training Load and Injury in Professional Rugby League Players*. Journal of Science and Medicine in Sport, 2011. **14**(3): p. 204-9.
113. T. J. Gabbett and M. J. Mulvey, *Time-Motion Analysis of Small-Sided Training Games and Competition in Elite Women Soccer Players*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2008. **22**(2): p. 543-52.
114. T. F. Gallo, et al., *Pre-Training Perceived Wellness Impacts Training Output in Australian Football Players*. Journal of Sports Sciences, 2016. **34**(15): p. 1445-51.
115. P. Gamble, *A Skill-Based Conditioning Games Approach to Metabolic Conditioning for Elite Rugby Football Players*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2004. **18**(3): p. 491-7.
116. P. Gaudino, et al., *Factors Influencing Perception of Effort (Session Rating of Perceived Exertion) During Elite Soccer Training*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2015. **10**(7): p. 860-4.
117. E. Gil-Rey, A. Lezaun and A. Los Arcos, *Quantification of the Perceived Training Load and Its Relationship with Changes in Physical Fitness Performance in Junior Soccer Players*. Journal of Sports Sciences, 2015. **33**(20): p. 2125-32.
118. E. M. Gorostiaga, et al., *Effects of an Entire Season on Physical Fitness Changes in Elite Male Handball Players*. Medicine & Science in Sports & Exercise, 2006. **38**(2): p. 357-66.
119. A. J. Gray, et al., *Validity and Reliability of Gps for Measuring Distance Travelled in Field-Based Team Sports*. Journal of Sports Sciences, 2010. **28**(12): p. 1319-25.
120. A. Gualtieri, et al., *Workload Monitoring in Top-Level Soccer Players During Congested Fixture Periods*. International Journal of Sports Medicine, 2020. **41**(10): p. 677-681.
121. J. Halouani, et al., *Small-Sided Games in Team Sports Training: A Brief Review*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2014. **28**(12): p. 3594-618.

122. S. L. Halson, *Monitoring Training Load to Understand Fatigue in Athletes*. Sports Medicine, 2014. **44 Suppl 2**(2): p. S139-47.
123. S. L. Halson and A. E. Jeukendrup, *Does Overtraining Exist?* Sports medicine, 2004. **34**(14): p. 967-981.
124. M. Hardin, et al., *Which Chart or Graph Is Right for You? Tell Impactful Stories with Data*. Tableau Software, 2012.
125. D. J. Harper, C. Carling and J. Kiely, *High-Intensity Acceleration and Deceleration Demands in Elite Team Sports Competitive Match Play: A Systematic Review and Meta-Analysis of Observational Studies*. Sports Medicine, 2019. **49**(12): p. 1923-1947.
126. J. Hausler, M. Halaki and R. Orr, *Application of Global Positioning System and Microsensor Technology in Competitive Rugby League Match-Play: A Systematic Review and Meta-Analysis*. Sports Medicine, 2016. **46**(4): p. 559-88.
127. C. Hausswirth, et al., *Evidence of Disturbed Sleep and Increased Illness in Overreached Endurance Athletes*. Medicine & Science in Sports & Exercise, 2014. **46**(5): p. 1036-45.
128. S. V. Hill-Haas, et al., *Physiology of Small-Sided Games Training in Football: A Systematic Review*. Sports Medicine, 2011. **41**(3): p. 199-220.
129. E. Hollville, et al. *Minimaxx Player Load as an Index of the Center of Mass Displacement? A Validation Study*. in *ISBS-Conference Proceedings Archive*. 2015.
130. E. Hollville, et al., *A Novel Accelerometry-Based Metric to Improve Estimation of Whole-Body Mechanical Load*. Sensors (Basel), 2021. **21**(10): p. 3398.
131. S. L. Hooper and L. T. Mackinnon, *Monitoring Overtraining in Athletes. Recommendations*. Sports Medicine, 1995. **20**(5): p. 321-7.
132. M. W. Hoppe, et al., *Validity and Reliability of Gps and Lps for Measuring Distances Covered and Sprint Mechanical Properties in Team Sports*. PLoS One, 2018. **13**(2): p. e0192708.
133. J. C. Hourcade, et al., *Quatre Mois De Charge D'entraînement globale Et Par Exercice Chez Le Footballeur Professionnel*. Science & Sports, 2017. **32**(4): p. 221-228.
134. F. M. Impellizzeri, et al., *Physiological and Performance Effects of Generic Versus Specific Aerobic Training in Soccer Players*. International Journal of Sports Medicine, 2006. **27**(6): p. 483-92.
135. F. M. Impellizzeri, S. M. Marcora and A. J. Coutts, *Internal and External Training Load: 15 Years On*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2019. **14**(2): p. 270-273.
136. F. M. Impellizzeri, et al., *Use of Rpe-Based Training Load in Soccer*. Medicine & Science in Sports & Exercise, 2004. **36**(6): p. 1042-7.
137. F. M. Impellizzeri, E. Rampinini and S. M. Marcora, *Physiological Assessment of Aerobic Training in Soccer*. Journal of Sports Sciences, 2005. **23**(6): p. 583-92.

138. V. B. Issurin, *New Horizons for the Methodology and Physiology of Training Periodization*. Sports Medicine, 2010. **40**(3): p. 189-206.
139. R. Izzo and S. Sopranzetti, *Speed, Acceleration, Deceleration and Metabolic Power in the Work to Roles for a Workout More Targeted in Elite Football*. Medicine & Science in Sports & Exercise, 2010. **42**(1): p. 173.
140. R. Izzo, et al., *Video Tracking for the Detection of External Load to Establish Proper Parameters in Elite Soccer Players During High Intensity Training*. Journal of Physical Education and Sport, 2018. **2018**(2): p. 1199-1202.
141. A. Jaspers, et al., *Relationships between Training Load Indicators and Training Outcomes in Professional Soccer*. Sports Medicine, 2017. **47**(3): p. 533-544.
142. D. Jennings, et al., *The Validity and Reliability of Gps Units for Measuring Distance in Team Sport Specific Running Patterns*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2010a. **5**(3): p. 328-41.
143. D. Jennings, et al., *Variability of Gps Units for Measuring Distance in Team Sport Movements*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2010b. **5**(4): p. 565-9.
144. A. R. Jensenius, et al., *A Study of the Noise-Level in Two Infrared Marker-Based Motion Capture Systems*. 2012.
145. R. J. Johnston, et al., *Validity and Interunit Reliability of 10 Hz and 15 Hz Gps Units for Assessing Athlete Movement Demands*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2014. **28**(6): p. 1649-55.
146. R. J. Johnston, et al., *The Validity and Reliability of 5-Hz Global Positioning System Units to Measure Team Sport Movement Demands*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2012. **26**(3): p. 758-65.
147. C. Karcher and M. Buchheit, *On-Court Demands of Elite Handball, with Special Reference to Playing Positions*. Sports Medicine, 2014. **44**(6): p. 797-814.
148. J. J. Kavanagh and H. B. Menz, *Accelerometry: A Technique for Quantifying Movement Patterns During Walking*. Gait & Posture, 2008. **28**(1): p. 1-15.
149. S. J. Kelly, et al., *Reliability and Validity of Sports Accelerometers During Static and Dynamic Testing*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2015. **10**(1): p. 106-11.
150. T. Kempton, et al., *Match-Related Fatigue Reduces Physical and Technical Performance During Elite Rugby League Match-Play: A Case Study*. Journal of Sports Sciences, 2013. **31**(16): p. 1770-80.
151. D. C. Kennett, T. Kempton and A. J. Coutts, *Factors Affecting Exercise Intensity in Rugby-Specific Small-Sided Games*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2012. **26**(8): p. 2037-42.
152. M. J. Klusemann, et al., *Optimising Technical Skills and Physical Loading in Small-Sided Basketball Games*. Journal of Sports Sciences, 2012. **30**(14): p. 1463-71.
153. A. Kniubaite, et al., *Quantification of External and Internal Match Loads in Elite Female Team Handball*. Biology of Sport, 2019. **36**(4): p. 311-316.

154. P. Kunz, et al., *A Meta-Comparison of the Effects of High-Intensity Interval Training to Those of Small-Sided Games and Other Training Protocols on Parameters Related to the Physiology and Performance of Youth Soccer Players*. *Sports Medicine Open*, 2019. **5**(1): p. 7.
155. M. Lacome. (2013). *Time Motion Analysis and Applied Physiology in Rugby Union : Study of Fatigue Associated with Repeated Isometric Maximal Exercise*. Université Claude Bernard - Lyon I.
156. M. Lacome, et al., *A New Approach to Quantifying Physical Demand in Rugby Union*. *Journal of Sports Sciences*, 2014. **32**(3): p. 290-300.
157. M. Lacome, B. Simpson and M. Buchheit, *Monitoring Training Status with Player-Tracking Technology*. *ASPETAR Sports Medicine Journal*, 2018a. **7**.
158. M. Lacome, et al., *Small-Sided Games in Elite Soccer: Does One Size Fit All?* *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2018b. **13**(5): p. 568-576.
159. M. I. Lambert and J. Borresen, *Measuring Training Load in Sports*. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2010. **5**(3): p. 406-11.
160. P. Larsson, *Global Positioning System and Sport-Specific Testing*. *Sports Medicine*, 2003. **33**(15): p. 1093-101.
161. Y. Le Meur, et al., *A Multidisciplinary Approach to Overreaching Detection in Endurance Trained Athletes*. *Journal of Applied Physiology* (1985), 2013a. **114**(3): p. 411-20.
162. Y. Le Meur, et al., *Evidence of Parasympathetic Hyperactivity in Functionally Overreached Athletes*. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2013b. **45**(11): p. 2061-71.
163. K. A. Lemmink and C. Visscher, *Effect of Intermittent Exercise on Multiple-Choice Reaction Times of Soccer Players*. *Perceptual and Motor Skills*, 2005. **100**(1): p. 85-95.
164. D. Linke, D. Link and M. Lames, *Football-Specific Validity of Tracab's Optical Video Tracking Systems*. *PLoS One*, 2020. **15**(3): p. e0230179.
165. T. Little and A. G. Williams, *Suitability of Soccer Training Drills for Endurance Training*. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 2006. **20**(2): p. 316-9.
166. A. Los Arcos, A. Mendez-Villanueva and R. Martinez-Santos, *In-Season Training Periodization of Professional Soccer Players*. *Biology of Sport*, 2017. **34**(2): p. 149-155.
167. I. Loturco, et al., *Traditional Periodization Versus Optimum Training Load Applied to Soccer Players: Effects on Neuromuscular Abilities*. *International Journal of Sports Medicine*, 2016. **37**(13): p. 1051-1059.
168. M. C. Luig P., Perše M., Kristan M., *Motion Characteristics According to Playing Position in International Men's Team Handball.*, in *13th Annual Congress of the European College of Sports Science*. 2008.
169. L. S. Luteberget, B. R. Holme and M. Spencer, *Reliability of Wearable Inertial Measurement Units to Measure Physical Activity in Team Handball*. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2018a. **13**(4): p. 467-473.

170. L. S. Luteberget and M. Spencer, *High-Intensity Events in International Women's Team Handball Matches*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2017. **12**(1): p. 56-61.
171. L. S. Luteberget, M. Spencer and M. Gilgien, *Validity of the Catapult Clearsky T6 Local Positioning System for Team Sports Specific Drills, in Indoor Conditions*. Frontiers in Physiology, 2018b. **9**: p. 115.
172. L. S. Luteberget, H. P. Trollerud and M. Spencer, *Physical Demands of Game-Based Training Drills in Women's Team Handball*. Journal of sports sciences, 2018c. **36**(5): p. 592-598.
173. J. J. Malone, et al., *Seasonal Training-Load Quantification in Elite English Premier League Soccer Players*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2015. **10**(4): p. 489-97.
174. J. J. Malone, et al., *Unpacking the Black Box: Applications and Considerations for Using Gps Devices in Sport*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2017. **12**(Suppl 2): p. S218-S226.
175. C. Manchado, et al., *Time–Motion Analysis by Playing Positions of Male Handball Players During the European Championship 2020*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021. **18**(6): p. 2787.
176. D. Marqués-Jiménez, et al., *Fatigue and Recovery in Soccer: Evidence and Challenges*. The Open Sports Sciences Journal, 2017. **10**(1).
177. B. Marrier, et al., *Training Periodization over an Elite Rugby Sevens Season: From Theory to Practice*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2018. **14**(1): p. 1-9.
178. A. Martin-Garcia, et al., *Positional Demands for Various-Sided Games with Goalkeepers According to the Most Demanding Passages of Match Play in Football*. Biology of Sport, 2019. **36**(2): p. 171-180.
179. L. Matveyev, *Problem of Periodization the Sport Training*. Moscú, Rusia: FiS Publisher, 1964.
180. S. J. McLaren, et al., *The Relationships between Internal and External Measures of Training Load and Intensity in Team Sports: A Meta-Analysis*. Sports Medicine, 2018. **48**(3): p. 641-658.
181. D. A. McLean, *Analysis of the Physical Demands of International Rugby Union*. Journal of Sports Sciences, 1992. **10**(3): p. 285-96.
182. R. Meeusen, et al., *Prevention, Diagnosis and Treatment of the Overtraining Syndrome: Joint Consensus Statement of the European College of Sport Science (Ecss) and the American College of Sports Medicine (Acsm)*. European Journal of Sport Science, 2013. **13**(1): p. 1-24.
183. R. Meeusen, et al., *Hormonal Responses in Athletes: The Use of a Two Bout Exercise Protocol to Detect Subtle Differences in (over) Training Status*. European journal of applied physiology, 2004. **91**(2): p. 140-146.
184. P. Merriault, et al., *A Study of Vicon System Positioning Performance*. Sensors (Basel), 2017. **17**(7): p. 1591.

185. T. Meyer, H. H. Gabriel and W. Kindermann, *Is Determination of Exercise Intensities as Percentages of Vo₂max or Hrmax Adequate?* *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 1999. **31**(9): p. 1342-5.
186. L. Michalsik, H. Søndergaard and M. Flynn. *Team Handball Match Analysis by Computer Tracking from the Men's European Championships 2016*. in *Crossing borders through Sport Science. Proceedings of the 21th Annual Congress of the European College of Sport Science, Vienna, Austria*. 2016.
187. L. B. Michalsik and P. Aagaard, *Physical Demands in Elite Team Handball: Comparisons between Male and Female Players*. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 2015. **55**(9): p. 878-891.
188. L. B. Michalsik, P. Aagaard and K. Madsen, *Locomotion Characteristics and Match-Induced Impairments in Physical Performance in Male Elite Team Handball Players*. *International Journal of Sports Medicine*, 2013. **34**(7): p. 590-9.
189. L. B. Michalsik, K. Madsen and P. Aagaard, *Match Performance and Physiological Capacity of Female Elite Team Handball Players*. *International Journal of Sports Medicine*, 2014. **35**(7): p. 595-607.
190. L. B. Michalsik, K. Madsen and P. Aagaard, *Physiological Capacity and Physical Testing in Male Elite Team Handball*. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 2015. **55**(5): p. 415-29.
191. L. B. A. Michalsik, P., *Physical Demands in Elite Team Handball Comparisons between Male and Female Players*. *The journal of Sports Medicine and physical fitness*, 2015. **55**: p. 878-891.
192. C. L.-P. Miguel A. Gómez, Jorge Viaño and Iván González-García, *Effects of Game Location, Team Quality and Final Outcome on Game-Related Statistics in Professional Handball Close Games*. *Kinesiology : international journal of fundamental and applied kinesiology*, 2014. **46**.
193. M. Mohr, P. Krstrup and J. Bangsbo, *Match Performance of High-Standard Soccer Players with Special Reference to Development of Fatigue*. *Journal of Sports Sciences*, 2003. **21**(7): p. 519-28.
194. A. Moreira, et al., *Effect of a Congested Match Schedule on Immune-Endocrine Responses, Technical Performance and Session-Rpe in Elite Youth Soccer Players*. *Journal of Sports Sciences*, 2016. **34**(24): p. 2255-2261.
195. R. Nagahara, et al., *Concurrent Validity of Gps for Deriving Mechanical Properties of Sprint Acceleration*. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2016. **12**(1): p. 129-132.
196. N. J. Nedergaard, et al., *The Relationship between Whole-Body External Loading and Body-Worn Accelerometry During Team-Sport Movements*. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2017. **12**(1): p. 18-26.
197. D. P. Nicolella, et al., *Validity and Reliability of an Accelerometer-Based Player Tracking Device*. *PLoS One*, 2018. **13**(2): p. e0191823.
198. R. Oliveira, et al., *In-Season Training Load Quantification of One-, Two- and Three-Game Week Schedules in a Top European Professional Soccer Team*. *Physiology & Behavior*, 2019. **201**: p. 146-156.

199. R. Oliveira, et al., *Will Next Match Location Influence External and Internal Training Load of a Top-Class Elite Professional European Soccer Team?* International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021. **18**(10): p. 5229.
200. T. Oliveira, M. Gomez and J. Sampaio, *Effects of Game Location, Period, and Quality of Opposition in Elite Handball Performances.* Perceptual and Motor Skills, 2012. **114**(3): p. 783-94.
201. M. Pernigoni, et al., *Assessing the External Load Associated with High-Intensity Activities Recorded During Official Basketball Games.* Frontiers in Psychology, 2021. **12**: p. 668194.
202. C. Petersen, et al., *Validity and Reliability of Gps Units to Monitor Cricket-Specific Movement Patterns.* International Journal of Sports Physiology and Performance, 2009. **4**(3): p. 381-93.
203. J. Pino-Ortega, et al., *Validity and Reliability of an Eight Antennae Ultra-Wideband Local Positioning System to Measure Performance in an Indoor Environment.* Sports Biomechanics, 2020: p. 1-11.
204. P. Pori, *Analysis of Loading and Effort of Wing Players in Team Handball.* Ljubljana: University of Ljubljana, 2003.
205. M. D. Portas, et al., *The Validity and Reliability of 1-Hz and 5-Hz Global Positioning Systems for Linear, Multidirectional, and Soccer-Specific Activities.* International Journal of Sports Physiology and Performance, 2010. **5**(4): p. 448-58.
206. S. Póvoas, *Estudo Do Jogo E Do Jogador De Andebol De Elite.* 2009.
207. S. C. Póvoas, Ascensão, A. A., Magalhães, J., Seabra, A. F., Krstrup, P., Soares, J. M., & Rebelo, A. N., *Physiological Demands of Elite Team Handball with Special Reference to Playing Position.* Journal of strength and conditioning research, 2014. **28**(2): p. 430–442.
208. M. Price and K. Halabi, *The Effects of Work–Rest Duration on Intermittent Exercise and Subsequent Performance.* Journal of sports sciences, 2005. **23**(8): p. 835-842.
209. D. Rainham, et al., *Development of a Wearable Global Positioning System for Place and Health Research.* International Journal of Health Geographics, 2008. **7**(1): p. 59.
210. E. Rampinini, et al., *Accuracy of Gps Devices for Measuring High-Intensity Running in Field-Based Team Sports.* International Journal of Sports Medicine, 2014. **36**(1): p. 49-53.
211. E. Rampinini, et al., *Factors Influencing Physiological Responses to Small-Sided Soccer Games.* Journal of Sports Sciences, 2007. **25**(6): p. 659-66.
212. F. Rannou, et al., *Physiological Profile of Handball Players.* The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness, 2001. **41**(3): p. 349-53.
213. J. C. Rawstorn, et al., *Rapid Directional Change Degrades Gps Distance Measurement Validity During Intermittent Intensity Running.* PLoS One, 2014. **9**(4): p. e93693.
214. T. Reilly, *A Motion Analysis of Work-Rate in Different Positional Roles in Professional Football Match-Play.* Journal of Human Movement Studies, 1976. **2**: p. 87-97.

215. J. G. Richards, *The Measurement of Human Motion: A Comparison of Commercially Available Systems*. Human Movement Science, 1999. **18**(5): p. 589-602.
216. S. P. Roberts, et al., *The Physical Demands of Elite English Rugby Union*. Journal of Sports Sciences, 2008. **26**(8): p. 825-33.
217. J. Robineau, et al., *"Road to Rio": A Case Study of Workload Periodization Strategy in Rugby-7s During an Olympic Season*. Frontiers in Sports and Active Living, 2020. **1**: p. 72.
218. S. Ryan, T. Kempton and A. J. Coutts, *Data Reduction Approaches to Athlete Monitoring in Professional Australian Football*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2021. **16**(1): p. 59-65.
219. J. Sampaio, et al., *Heart Rate and Perceptual Responses to 2 X 2 and 3 X 3 Small-Sided Youth Soccer Games*. Journal of Sports Science and Medicine, 2007. **6**(Suppl 10): p. 121-122.
220. H. Sarmiento, et al., *Match Analysis in Football: A Systematic Review*. Journal of Sports Sciences, 2014. **32**(20): p. 1831-1843.
221. R. Sassi, T. Reilly and F. Impellizzeri, *A Comparison of Small-Side Games and Interval Training in Elite Professional Soccer Players*. Science and football V. Oxon: Routledge, 2005: p. 352-4.
222. A. T. Scanlan, et al., *Training Mode's Influences on the Relationships between Training-Load Models During Basketball Conditioning*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2014. **9**(5): p. 851-6.
223. S. Scantlebury, et al., *Achieving a Desired Training Intensity through the Prescription of External Training Load Variables in Youth Sport: More Pieces to the Puzzle Required*. Journal of Sports Sciences, 2020: p. 1-8.
224. Y. Schutz and A. Chambaz, *Could a Satellite-Based Navigation System (Gps) Be Used to Assess the Physical Activity of Individuals on Earth?* European journal of clinical nutrition, 1997. **51**(5): p. 338-339.
225. B. R. Scott, et al., *A Comparison of Methods to Quantify the in-Season Training Load of Professional Soccer Players*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2013. **8**(2): p. 195-202.
226. M. T. Scott, T. J. Scott and V. G. Kelly, *The Validity and Reliability of Global Positioning Systems in Team Sport: A Brief Review*. Journal of Strength & Conditioning Research, 2015. **30**(5): p. 1470-90.
227. H. Selye, *Stress and the General Adaptation Syndrome*. British Medical Journal, 1950. **1**(4667): p. 1383-92.
228. H. Selye, *The Stress of Life*. New York, Mc Gran-Hill Book Company. 1956, Inc.
229. H. Selye, *[the Stress Syndrome]*. Kango Gijutsu, 1965. **11**(11): p. 92-8.
230. F. R. Serpiello, et al., *Validity of an Ultra-Wideband Local Positioning System to Measure Locomotion in Indoor Sports*. Journal of Sports Sciences, 2018. **36**(15): p. 1727-1733.

231. M. V. Šibila, Dinko ; Pori, Primož, *Position-Related Differences in Volume and Intensity of Large-Scale Cyclic Movements of Male Players in Handball*. *Kinesiology : international journal of fundamental and applied kinesiology*, 2004. **36**: p. 58-68.
232. L. L. Smith, *Cytokine Hypothesis of Overtraining: A Physiological Adaptation to Excessive Stress?* *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2000. **32**(2): p. 317-31.
233. T. G. Stevens, et al., *Quantification of in-Season Training Load Relative to Match Load in Professional Dutch Eredivisie Football Players*. *Science and Medicine in Football*, 2017. **1**(2): p. 117-125.
234. T. G. Stevens, et al., *Measuring Acceleration and Deceleration in Soccer-Specific Movements Using a Local Position Measurement (Lpm) System*. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2014. **9**(3): p. 446-56.
235. L. Svilar, et al., *Positional Differences in Elite Basketball: Selecting Appropriate Training-Load Measures*. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2018. **13**(7): p. 947-952.
236. M. Tanaka, L. Michalsik and J. Bangsbo, *Activity Profiles During an Official League Game of Danish Elite Team Handball Players*. *Japanese Journal of Physical Fitness and Sports Medicine*, 2002. **15**(1): p. 61-73.
237. J. C. Tee, M. Ashford and D. Piggott, *A Tactical Periodization Approach for Rugby Union*. *Strength & Conditioning Journal*, 2018. **40**(5): p. 1-13.
238. R. T. Thorpe, et al., *The Influence of Changes in Acute Training Load on Daily Sensitivity of Morning-Measured Fatigue Variables in Elite Soccer Players*. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2017. **12**(Suppl 2): p. S2107-S2113.
239. C. Twist, et al., *Player Responses to Match and Training Demands During an Intensified Fixture Schedule in Professional Rugby League: A Case Study*. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2017. **12**(8): p. 1093-1099.
240. J. Vanrenterghem, et al., *Training Load Monitoring in Team Sports: A Novel Framework Separating Physiological and Biomechanical Load-Adaptation Pathways*. *Sports Medicine*, 2017. **47**(11): p. 2135-2142.
241. M. C. Varley, G. P. Elias and R. J. Aughey, *Current Match-Analysis Techniques' Underestimation of Intense Periods of High-Velocity Running*. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2012a. **7**(2): p. 183-5.
242. M. C. Varley, I. H. Fairweather and R. J. Aughey, *Validity and Reliability of Gps for Measuring Instantaneous Velocity During Acceleration, Deceleration, and Constant Motion*. *Journal of Sports Sciences*, 2012b. **30**(2): p. 121-7.
243. W. M. Vickery, et al., *Accuracy and Reliability of Gps Devices for Measurement of Sports-Specific Movement Patterns Related to Cricket, Tennis, and Field-Based Team Sports*. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 2014. **28**(6): p. 1697-705.
244. N. B. Vollaard, et al., *Systematic Analysis of Adaptations in Aerobic Capacity and Submaximal Energy Metabolism Provides a Unique Insight into Determinants of Human Aerobic Performance*. *Journal of Applied Physiology* (1985), 2009. **106**(5): p. 1479-86.

245. H. Wagner, et al., *Physical Performance in Elite Male and Female Team Handball Players*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2018: p. 1-24.
246. M. Waldron, et al., *Concurrent Validity and Test-Retest Reliability of a Global Positioning System (Gps) and Timing Gates to Assess Sprint Performance Variables*. Journal of Sports Sciences, 2011. **29**(15): p. 1613-9.
247. L. Wallace, K. Slattery and A. J. Coutts, *A Comparison of Methods for Quantifying Training Load: Relationships between Modelled and Actual Training Responses*. European journal of applied physiology, 2014. **114**(1): p. 11-20.
248. D. Weaving, et al., *The Case for Adopting a Multivariate Approach to Optimize Training Load Quantification in Team Sports*. Frontiers in Physiology, 2017. **8**: p. 1024.
249. M. Weston, et al., *The Application of Differential Ratings of Perceived Exertion to Australian Football League Matches*. Journal of Science and Medicine in Sport, 2015. **18**(6): p. 704-8.
250. E. H. Wik, L. S. Luteberget and M. Spencer, *Activity Profiles in International Women's Team Handball Using Playerload*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2017. **12**(7): p. 934-942.
251. M. Windolf, N. Gotzen and M. Morlock, *Systematic Accuracy and Precision Analysis of Video Motion Capturing Systems--Exemplified on the Vicon-460 System*. Journal of Biomechanics, 2008. **41**(12): p. 2776-80.
252. W. Winterbottom, *Soccer Coaching*. London: Naldrett Press., 1952.
253. T. H. Witte and A. M. Wilson, *Accuracy of Non-Differential Gps for the Determination of Speed over Ground*. Journal of Biomechanics, 2004. **37**(12): p. 1891-8.
254. S. Younesi, et al., *Session-to-Session Variations of Internal Load During Different Small-Sided Games: A Study in Professional Soccer Players*. Research in Sports Medicine, 2021. **29**(5): p. 462-474.

Caractérisation de la charge d'entraînement en Handball élite par comparaison avec les situations de compétitions.

Résumé

La professionnalisation de l'activité Handball a engendré une augmentation du rythme des matchs et de leur intensité. Au niveau élite, l'organisation de la préparation physique et de la récupération doit être optimale afin de permettre aux joueurs de maintenir leur niveau de performance tout au long de la saison. Toutefois, le niveau des connaissances scientifiques actuel sur l'activité Handball reste encore parcellaire, notamment concernant l'intensité déployée par les joueurs lors des matchs et les stratégies de gestion de la charge d'entraînement (CE) mises en place. Cette thèse a donc pour but, chez une équipe de Handball faisant partie du plus haut niveau français et européen, de caractériser les exigences locomotrices maximales durant les matchs et les entraînements, et d'analyser la dynamique de CE, en fonction du nombre de jours disponibles entre deux matchs. Préalablement à cela, la validité d'un nouvel outil de mesure de l'activité sera analysée. L'étude des données fournies par le nouveau système de positionnement local Kinexon™ a montré que celui-ci est valide pour quantifier l'activité Handball. L'analyse des intensités de matchs a montré que le poste d'ailier présente les pics d'intensité les plus élevés. Par ailleurs, aucun exercice d'entraînement, parmi ceux analysés, n'est en mesure de reproduire les intensités de match. Cela révèle que le rythme des matchs limite les opportunités de proposer des exercices de haute intensité. Enfin, l'analyse de la dynamique de CE a montré que les lendemains de matchs présentaient une diminution de la CE. Les veilles de matchs sont quant à elle constantes en termes de volume et d'intensité de travail quelle que soit le délai entre deux matchs. Cela souligne l'importance de cet entraînement pour procéder aux derniers ajustement technique et tactique tout en proposant un travail physique adapté.

Mots clés : Handball, LPS, Exigences de Match, Jeux Réduits, Suivi de la Charge, Périodisation

Training load characterisation in elite Handball by comparison with competitive situations.

Abstract

The professionalisation of Handball has led to an increase in the frequency and intensity of matches. At the elite level, workload management strategies must be optimal to enable players to maintain their level of performance throughout the season. However, the current state of scientific knowledge on Handball activity is still incomplete, particularly concerning the intensity deployed by players during matches and training sessions. This thesis aims to characterise the peak locomotor demands of a high-level French and European Handball team. The purpose is also to analyse the workload dynamics as a function of the number of days available between two matches. Before this, the first objective was to investigate the validity of a new local positioning system used to quantify player activity. The study of the data provided by the new Kinexon™ local positioning system has shown that it is valid for the quantification of Handball activity. The analysis of the intensities of the matches showed that the winger position has the highest peak intensities. However, none of the training exercises analysed was able to reproduce the match intensities. This outcome reveals that the rhythm of the matches limits the possibilities of proposing high-intensity exercises. Finally, the analysis of the dynamics of the training load showed a decreased workload on the day following the competition. In contrast, the training load on the day before a game was constant regarding workload volume and intensity, regardless of the time between matches. This result underlines the importance of this training to make final technical and tactical adjustments while providing adapted physical work.

Key WordsWords: Handball, LPS, Match Demands, Small-Sided Games, Monitoring, Periodisation