



# Déterminants biomécanique, physiologique et modélisation physique de la performance en badminton

Michael Phomsoupha

► **To cite this version:**

Michael Phomsoupha. Déterminants biomécanique, physiologique et modélisation physique de la performance en badminton. Education. Université Paris-Saclay, 2016. Français. <NNT : 2016SACLS521>. <tel-01451130>

**HAL Id: tel-01451130**

**<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01451130>**

Submitted on 31 Jan 2017

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

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

Numéro National de Thèse : 2016 SACL5 521

# Université Paris-Sud et Paris-Saclay

## Mouvement Humain, Adaptation et Performance Sportive

Laboratoire : Complexité, Innovation et Activités Motrices et Sportives  
École doctorale n° 566 : Sciences du Sport, de la Motricité, du Mouvement Humain

# THÈSE

*En vue d'obtenir le grade de*

## Docteur en Sciences du Sport et du Mouvement Humain

*présentée et soutenue publiquement par*

**Michael Phomsoupha**

le 24 novembre 2016

## Déterminants biomécanique, physiologique et modélisation physique de la performance en badminton

**Jury présidé par M. Clanet Christophe**

### Jury

M. Bideau Benoît,	Pr., Université de Rennes 2	Rapporteur
M. Morlier Julien,	MCF-HDR, Université de Bordeaux 2	Rapporteur
M. Clanet Christophe,	Pr., École Polytechnique	Examineur
M. Colloud Floren,	MCF, Université de Poitiers	Examineur
M. Limouzin Philippe,	Directeur Technique National	Invité
M. Laffaye Guillaume,	MCF-HDR, Université de Paris-Sud et Paris-Saclay	Directeur

*“Sois reconnaissant envers tous, tous t’enseignent”*

Bouddha

## Que dire ... seulement merci!!!

La thèse arrive à son terme, la fin d’un chapitre vers le commencement d’une nouvelle aventure. Aux sentiments de satisfaction, de joie, mais aussi de tristesse de me séparer de certains d’entre vous. La réalisation de cette thèse est avant tout un moment de partage, de solidarité, rendant ce travail individuel collectif. À travers ces lignes, je voudrais remercier tous mes amis, collègues, proches qui ont permis la réalisation de ce travail et rendu ces années drôles, passionnantes et surtout enrichissantes.

Mes premiers remerciements iront à mon directeur de thèse **Guillaume**. Merci de m’avoir amené sur le chemin aventureux de la recherche. M’extrayant des petits collégiens et des grands lycéens pour les remplacer par les immenses étudiants... Merci de m’avoir appris les bases d’un chercheur, l’observation, l’analyse, la mesure, la compréhension de modèle incompréhensible. Merci pour ta présence, ton écoute, ta disponibilité (chez toi ou au laboratoire) et ton amitié. Merci de me raconter tous plein d’anecdotes sur ta recherche, sur toi qui montres la vie d’un chercheur qui est quand même assez sympa! Je voulais vraiment te remercier de m’avoir emmené à poser des plots tous les 50 m pour une expérimentation “très intéressante” sous le torrent de pluie! Merci aussi de m’avoir fait vraiment confiance sur mes compétences en badminton, en me lançant des volants à moins de 2 mètres où je devais smasher le plus fort possible avec de magnifique lunette de chimie lors de ma première année. Cela devrait être un test d’entrée obligatoire pour connaître la confiance que son directeur a envers son doctorant! Merci de m’avoir montré que la recherche était vraiment drôle, d’être un exemple en tant que chercheur et en tant que directeur. Merci de m’avoir aussi laissé une liberté et une autonomie afin que je me forme par moi-même et de toujours avoir su être à mon écoute quand j’avais des difficultés et des doutes. Et surtout merci

d’avoir passé autant de temps avec moi !

Je remercie également les examinateurs et les rapporteurs en charge de l’évaluation de mon travail de thèse, pour le temps, l’attention et les diverses remarques constructives que vous avez pu accorder à ce manuscrit.

Des personnes ont fortement contribué à mes débuts dans la recherche, et je voulais les remercier. Merci à **Christophe** pour son regard extérieur et son aide précieuse dans mon épanouissement scientifique. Je remercie **Caroline** et **Baptiste** pour m’avoir fait découvrir le monde de l’expérimentation.

Je voulais remercier tous les membres du CIAMS, pour l’ambiance festive qui règne dans le laboratoire. Merci pour les échanges que j’ai pu avoir chacun d’entre vous me permettant d’ouvrir mon champ de vision scientifique et de recherche. Je voulais commencer par remercier notre “ingénieur d’étude”, **Jean** m’a permis de m’initier aux différents matériels scientifiques et à la programmation informatique. Je remercie aussi **Nicolas** de m’avoir permis d’emprunter du matériel numérique plus longuement que prévu afin de réaliser mes expérimentations. Un merci à **Hadel** de m’avoir ouvert les locaux pour que je puisse travailler et réaliser l’ensemble de mes expérimentations. N’ayant pas assez de place pour remercier personnellement chaque personne, je remercie l’ensemble du personnel administratif pour m’avoir facilité mon travail doctoral.

En continuité des remerciements du personnel, je voulais remercier **Do** pour m’avoir aidé, conseillé et guidé durant ma thèse, me donnant ainsi des idées pour des expérimentations. Merci aux enseignants de biomécanique, **Paul**, **Bastien** et **Nicolas** pour leur regard avisé sur la biomécanique. Un merci à **Éric** et **Zakaria** pour l’aide précieuse en physiologie. Je remercie par la même occasion l’ensemble des enseignants que je ne peux longuement citer.

Je voulais aussi grandement remercier les enseignants STAPS qui m’ont permis d’obtenir le diplôme d’enseignant d’EPS. À travers ses lignes, je voudrais remercier **Pia** et **Yann** pour m’avoir aidé et orienté vers la recherche. Enfin, un énorme merci à **Philippe** pour les moments passés à Vichy et de m’avoir aidé dans l’obtention du

diplôme.

L'arrivée en thèse n'aura pas été identique sans l'accueil chaleureux des doctorants. Je voulais remercier **Stéphane**, mon "copilote" de thèse pour avoir ralenti sa cadence sur sa propre thèse pour que l'on puisse soutenir la même année. À travers ses lignes, je voulais te remercier de m'avoir aidé à relâcher la pression durant ma thèse et d'avoir été à mes côtés à chaque moment de la thèse. Je voulais remercier **Florie** pour avoir toujours pris des pauses avec moi alors que tu étais en plein travail. Un grand merci à **Bing Bing** pour être toujours optimiste à travers tes trajets Lyon-Orsay pour venir nous voir ! À **Guillaume**, un merci pour tes débats qui n'en finissent jamais dans la voiture et au bureau. À **Maxime** de m'avoir ouvert sur le champ de la prévention des blessures. Aux **Élodie(s)**, merci de toujours être disponible pour discuter des blessures du sportif. Je souhaite aussi remercier **Anne**, toujours positive et optimiste, rendant la thèse plus agréable. Un merci à **Servane**, qui, jusqu'à la fin m'a aidé pour les tâches administratives. À **Iréne** un merci pour avoir su garder un œil sur moi. N'ayant pas assez de place pour remercier tous les doctorants des différents bureaux et aux docteurs qui sont partis durant ma thèse, je voulais vous dire un grand merci.

La réalisation de cette thèse n'aura jamais vu le jour sans la présence des sportifs, entraîneurs, et étudiants que nous avons pu côtoyer. Il nous était suffisant d'avoir les "performances sportives" de **Guillaume** mais dans un souci d'anonymat, nous ne pouvions pas rendre publics ses records. Je remercie les étudiants STAPS Orsay à s'être prêtés au smash et avoir dû courir partout pour réaliser nos expérimentations. Merci aux joueurs du club de l'Hay les Roses, du Racing Club de France, de Bures sur Yvette pour les heures passées sur un terrain. Je remercie également **Frédéric** pour nous avoir laissé expérimenter sur les étudiants du diplôme d'État.

Enfin, je remercie ma famille qui m'a toujours soutenu, encouragé, rassuré dans les moments difficiles. Merci à mes **parents** pour leur amour, leur patience et leur soutien sans faille, sans qui je n'aurais jamais pu arriver où j'en suis maintenant. À travers ces quelques lignes, je voulais vous dire que je vous devais énormément. Je profite aussi de cette occasion pour remercier **David**, qui sans le savoir m'est toujours supporté et d'avoir eu un regard bienveillant sur mon travail. Je remercie aussi mes entraîneurs

**Yannick** pour m'avoir fait découvrir l'activité, d'avoir toujours su être à mes côtés et de m'aiguiller et **Quang** pour m'avoir soutenu durant ma thèse.

Enfin pour finir, je voulais avoir un petit mot pour la personne qui partage ma vie, à **Océane**, d'avoir su me supporter durant ce long long travail et de toujours être présente dans les bons comme dans les mauvais moments. Sans son soutien sans faille, ce travail aura été bien plus difficile. Merci d'avoir accepté de me suivre dans cette aventure qui n'a pas été de tout repos pour toi.

Mention spéciale à **Catherine** qui a lu et relu entièrement ma thèse. Merci d'avoir pris le temps de la lire et de la relire à travers les kilomètres qui nous séparent.





# Table des matières

<b>Remerciement</b>	<b>i</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>3</b>
0.1 Références . . . . .	7
<b>I Outils expérimentaux permettant l'évaluation et la détermination des différents niveaux d'expertise, du débutant à l'expert</b>	<b>3</b>
<b>1 Validation d'outils expérimentaux dans l'analyse de la vitesse du volant</b>	<b>7</b>
1.1 Le volant de badminton : trajectoire et aérodynamique . . . . .	9
1.2 Validation de deux matériels pour l'obtention des vitesses de projectiles	18
1.3 Références . . . . .	34
<b>2 Le "Multidirectional Repeated Sprint Ability for Badminton" : un test fiable et discriminant de l'expertise ?</b>	<b>43</b>
2.1 Anthropométrie et badminton . . . . .	47
2.2 Les tests physiologiques en badminton . . . . .	59
2.3 Le "Multidirectionnal Repeated Sprint Ability for Badminton" : un nouveau test spécifique pour discriminer l'expertise ? . . . . .	60
2.4 Références . . . . .	85
<b>II Déterminant des demandes physiologiques, neuromuscu-</b>	

<b>lares et psychologiques dans le maintien de la performance</b>	<b>99</b>
<b>3 “Caractérisation” de la fatigue sur la performance lors d’un match prolongé</b>	<b>103</b>
3.1 Les analyseurs temporels et notationnels de la performance . . . . .	107
3.2 La physiologie d’un match de badminton : état des connaissances . . . .	113
3.3 Analyse de la fatigue durant un match de badminton . . . . .	120
3.4 Références . . . . .	139
<b>III Optimisation et modélisation des mouvements du bras lors d’un smash et de la raquette de badminton</b>	<b>153</b>
<b>4 La vitesse du volant prédit-elle le niveau d’expertise ?</b>	<b>157</b>
4.1 Évolution de la vitesse du volant lors d’un smash selon les différents niveaux de degrés d’expertise . . . . .	159
4.2 Références . . . . .	166
<b>5 Comprendre, prévoir, optimiser et modéliser la raquette de badminton lors d’un smash</b>	<b>169</b>
5.1 Et le cordage de la raquette dans tout cela ? . . . . .	171
5.2 Modèle de la conservation de la quantité de mouvement lors d’une frappe	174
5.3 Le coefficient de restitution de l’énergie élastique du cordage . . . . .	175
5.4 Références . . . . .	178
<b>6 Modélisation biomécanique et physique du comportement de la raquette de badminton</b>	<b>181</b>
6.1 La raquette de badminton . . . . .	185
6.2 La déflexion de la raquette avec un vérin . . . . .	190
6.3 Modélisation de la déflexion de la raquette . . . . .	195
6.4 Prédiction de la vitesse du volant : un modèle physique validé par l’expérimentation . . . . .	197
6.5 Références . . . . .	203
<b>7 Influence du bras et de son mouvement dans la production de vitesse</b>	<b>209</b>
7.1 L’analyse cinématique et biomécanique durant un smash . . . . .	213

7.2	Le bras de levier . . . . .	221
7.3	Extension ou pronation de l'avant-bras, laquelle produit la plus grande vitesse? . . . . .	227
7.4	Références . . . . .	238
<b>8</b>	<b>Prédiction entre le modèle théorique et le record du monde et optimisation de la vitesse</b>	<b>249</b>
8.1	Comparaison entre le modèle et le record du monde de Tan Boon Heong	251
8.2	Optimisation de la vitesse selon le modèle théorique . . . . .	253
8.3	Références . . . . .	254
	<b>Conclusion générale</b>	<b>261</b>
	Limite durant le travail doctoral . . . . .	268
	Perspectives de recherche . . . . .	269
	<b>Liste des figures</b>	<b>VII</b>
	<b>Liste des tableaux</b>	<b>IX</b>
	<b>Acronymes</b>	<b>X</b>



*“La fin est dans le commencement, et cependant on continue.”*

Samuel Beckett, *Fin de partie* (1957)

## Introduction générale

Étymologiquement, le badminton provient du nom du château du Duc de Beaufort, “le Badminton House”, siégeant dans la ville anglaise du Gloucestershire en Angleterre au 19<sup>ème</sup> siècle. L’objectif du jeu était de maintenir le plus longtemps possible en l’air un volant à l’aide d’une raquette et de se faire des passes. Mais au fil du temps, cette activité prend une nouvelle tournure et devient un “sport duel” dans lequel le volant, frappé par une raquette, après avoir franchi le filet, doit toucher le sol dans le camp adverse ou ne pas être renvoyé par l’adversaire” (logique interne de l’activité).



(a) Représentation du château du Badminton House durant le 17<sup>ème</sup> siècle (b) Château du Badminton House de nos jours

FIGURE 1 – Évolution du château du Badminton House au cours des siècles

Le badminton fait parti des activités les plus pratiqués dans le monde avec 230 millions de pratiquants [Kwan *et al.*, 2010]. Il se positionne après le volley-ball, le cricket, le basket-ball, le tennis de table et le football. De plus, il est le sport national dans plusieurs pays comme la Chine [Phomsoupha et Laffaye, 2015]. En France, le nombre de pratiquants est en perpétuelle évolution avec une augmentation de +7%

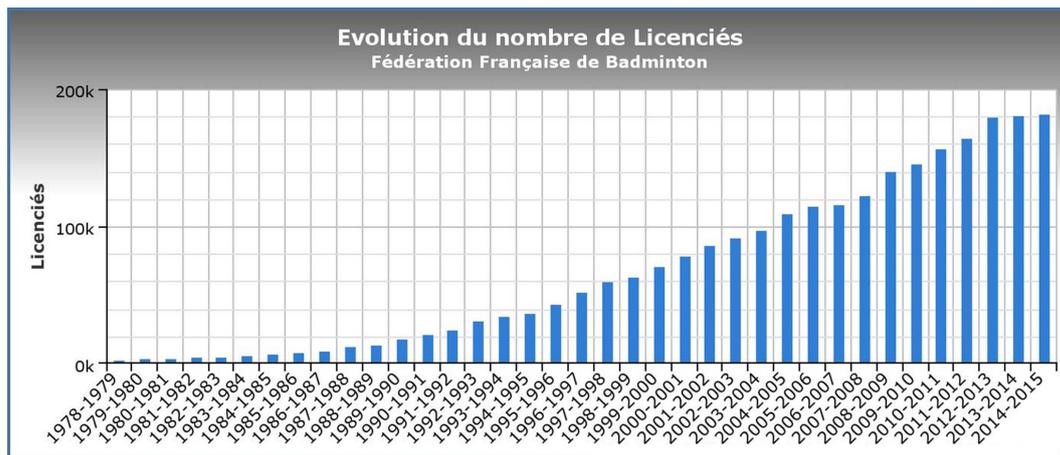


FIGURE 2 – Évolution du nombre de licenciés (données provenant de la [Fédération Française de Badminton \(FFBaD\)](#) - Poona)

à 18% de pratiquants supplémentaires chaque année et comptant plus de 180 000 licenciés (figure 2). La “prise en main rapide et facile” de l’activité sportive lui permet d’être pratiquée par tout le monde quelque soit l’âge ou l’expérience [Lo et Stark, 1991]. Sur le plan scolaire, le badminton est pratiqué avec plus de 110 000 scolaires et est le deuxième sport individuel dans le cadre de l’[Union Nationale du Sport Scolaire \(UNSS\)](#).

Le badminton est constitué de 5 disciplines, le simple homme et dame ; le double homme et dame ; et le mixte. Chaque discipline nécessite une préparation spécifique en terme de technique, de tactique et de capacité physique. L’incorporation du badminton dans les [Jeux Olympiques \(JO\)](#) de Barcelone en 1992 a permis d’augmenter le nombre de participants dans le monde. Durant les compétitions internationales, il y a entre un à trois matchs jouaient durant 4 à 5 jours d’épreuve. La grande compétition regroupant les meilleurs joueurs (après les [JO](#)) sont les “Super Series”, consistant à 12 compétitions par saison avec  $\approx 32$  à 44 joueurs de simple / double. En comparaison, ces compétitions représentent les “Grands Chelems” au tennis.

Les facteurs de performance en badminton sont multiples, révélant la complexité de ce sport. Il est caractérisé par une activité intermittente avec une forte intensité lors des échanges. Cependant, de par sa complexité, il est primordial de pouvoir analyser des composantes spécifiques à ce sport. Durant le match, les joueurs doivent maintenir un haut niveau d’intensité pour tenir les échanges et le match le plus longtemps possible. L’énergie dépensée dépend des facteurs morphologiques du joueur et de l’ef-

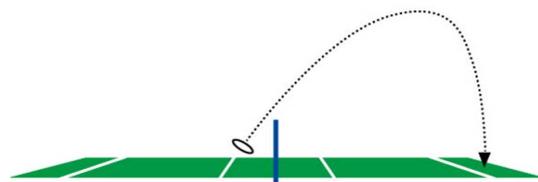


FIGURE 3 – Chronophotographie d’une frappe en badminton

ficience du déplacement. Les joueurs focalisent leur attention sur le volant et sur leur adversaire afin d’anticiper les frappes probables. La préparation de la frappe et le volant est atypique avec une trajectoire particulière [Alam *et al.*, 2009; Laffaye, 2013], exigeant des compétences spécifiques dans le but de renvoyer le volant dans le terrain adverse [Phomsoupha et Laffaye, 2015].



(a) Joueur se focalisant sur le volant lors d’un smash en extension



(b) Représentation d’une trajectoire de volant

Au cours de chaque action de frappe, les joueurs adaptent leurs mouvements usant des facteurs biomécaniques dans le but d’être le plus efficace afin de répondre à la contrainte adverse. Le badminton est caractérisé par des changements rapides de direction, des sauts, des fentes au filet et des mouvements rapides du bras à partir d’une grande variété de la position posturale [Hong *et al.*, 2014; Shariff *et al.*, 2009]. Ces facteurs influencent également les demandes physiologiques des joueurs.



(a) Appuis d'un joueur de badminton lors d'une fente au filet



(b) Déséquilibre postural pour frapper le volant

Ce travail doctoral tend à défendre la thèse selon laquelle il est possible de comprendre les facteurs de performance chez un joueur de badminton. Plus spécifiquement, nous faisons l'hypothèse première que des indicateurs précis, proche des situations écologiques, permettent de déterminer et de discriminer le niveau d'expertise d'un joueur. Nous formulons également l'hypothèse selon laquelle les joueurs experts parviennent à conserver un haut niveau de performance de jeu face à la fatigue lors d'un match prolongé. Notre dernière hypothèse cherchera à comprendre l'habileté d'un joueur à parvenir à une grande vitesse de volant lors d'un smash.

Plus spécifiquement, durant la première partie de ce travail, nous nous intéresserons dans notre premier chapitre à valider des outils expérimentaux permettant l'analyse et l'obtention de la vitesse du volant. Le second chapitre traitera de l'élaboration d'un test anaérobie, le [Multidirectional Repeated Sprint Ability for Badminton \(MRSAB\)](#), discriminant le niveau d'expertise et la diminution de la performance du joueur.

Par la suite, durant une deuxième partie de ce travail, nous nous intéresserons dans notre troisième chapitre à observer l'impact de la "fatigue" physiologique, psychologique et neuromusculaire sur les conditions de match des joueurs de badminton avec des indicateurs de performance précis et quantifiables. L'analyse de match observera les modifications des caractéristiques de match (temporelle et notationnelle).

Enfin dans la dernière partie de ce travail, nous nous intéresserons dans notre quatrième chapitre à analyser deux mouvements dominants lors de la frappe au niveau



FIGURE 6 – Démarche scientifique au cours de ce travail doctoral

de l'avant-bras, l'extension et la pronation radio-ulnaire. En analysant la contribution de ces mouvements sur la vitesse de la tête de raquette, la vitesse obtenue permet de catégoriser les joueurs selon leur niveau d'expertise. Le chapitre suivant s'intéressera à comprendre l'influence de la vitesse de la main dans l'optimisation et la modélisation de la raquette de badminton lors d'un smash. Par la suite, le chapitre suivant étudiera le principe de la conservation de la quantité du mouvement lors d'une frappe en badminton et l'influence du cordage dans la restitution de l'énergie. Enfin, le dernier chapitre questionnera le modèle obtenu afin de prédire la vitesse du volant selon l'ensemble des principes des chapitres précédents en la comparant avec la vitesse du record du monde. De plus ce dernier chapitre tentera de mettre en exergue la possibilité d'optimiser la vitesse du volant selon les principes précédents.

## 0.1 Références

- ALAM, F., CHOWDHURY, H., THEPPADUNGPORN, C. et SUBIC, A. (2009). Aerodynamic properties of badminton shuttlecock. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 4(3):266–272. 5
- HONG, Y., JUN WANG, S., KAI LAM, W. et TAK-MAN CHEUNG, J. (2014). Kinetics of badminton lunges in four directions. *Journal of Applied Biomechanics*, 30(1):113–118. 5

- KWAN, M., CHENG, C. L., TANG, W. T. et RASMUSSEN, J. (2010). Measurement of badminton racket deflection during a stroke. *Sports Engineering*, 12(3):143–153. 3
- LAFFAYE, G. (2013). *Comprendre et progresser au Badminton*. Sport Pratique. 5
- LO, D. et STARK, K. (1991). The badminton overhead shot. *Sports performance Series. National Strength and Conditioning Association Journal*, 13:6–13. 4
- PHOMSOUPHA, M. et LAFFAYE, G. (2015). The science of badminton : game characteristics, anthropometry, physiology, visual fitness and biomechanics. *Sports Medicine*, 45(4):473–495. 3, 5
- SHARIFF, A. H., GEORGE, J. et RAMLAN, A. A. (2009). Musculoskeletal injuries among Malaysian badminton players. *Singapore Medical Journal*, 50(11):1095–1097. 5





## Première partie

Outils expérimentaux permettant  
l'évaluation et la détermination des  
différents niveaux d'expertise, du  
débutant à l'expert



---

## Introduction

Au cours de cette partie, nous nous intéresserons aux différents outils permettant la classification d'un joueur selon son expertise en badminton. À travers des compétences sportives spécifiques, telles que la vitesse de déplacement et la vitesse produite lors d'un smash, il est possible de "catégoriser" le niveau de chaque pratiquant en badminton. Cependant, il est primordial d'utiliser des outils et des tests spécifiques à l'activité. Les premières questions qui ont pu émerger de ce constat nous ont amenés à nous questionner sur les outils expérimentaux permettant l'enregistrement d'une grande vitesse. Quels sont les outils à disposition ? Quels sont leurs fiabilités pour capturer de grandes vitesses comme le volant de badminton ? Après le recueil des données de la vitesse du volant, la vitesse de déplacement est un facteur important de la performance. Il nous a été amené à nous questionner sur la construction d'un test spécifique mettant en avant la vitesse de déplacement. Quelles sont les caractéristiques et les stratégies de déplacement selon le niveau d'expertise ? Existe-t-il un déplacement permettant d'être le plus efficient qu'un autre ?

Ainsi dans cette partie, nous émettons l'hypothèse que la vitesse du volant est un facteur discriminant de la performance sportive en badminton. La vitesse du projectile est corrélée au niveau d'expertise du joueur. Pour ce faire, nous analyserons et comparerons des outils expérimentaux tels qu'un radar "Doppler" et une centrale inertielle composée d'un accéléromètre et d'un gyroscope. Par la suite, nous observerons la mise en place d'un test spécifique à l'activité prenant en considération la vitesse de déplacement.



# Chapitre 1

## Validation d'outils expérimentaux dans l'analyse de la vitesse du volant

■ *The expert in anything was once a  
beginner* ■

---

Helen Hayes

### Sommaire

---

<b>1.1 Le volant de badminton : trajectoire et aérodynamique</b>	<b>9</b>
1.1.1 Les particularités aérodynamiques du projectile	10
1.1.2 Les différentes trajectoires du projectile	12
1.1.3 Trajectoire de volant après impact	14
1.1.4 Simulation des trajectoires des volants	16
1.1.5 Aérodynamisme du volant	16
<b>1.2 Validation de deux matériels pour l'obtention des vitesses de projectiles</b>	<b>18</b>
1.2.1 Objectif	21
1.2.2 Protocole expérimental	22
1.2.3 Résultats	26
1.2.4 Discussion	28
<b>1.3 Références</b>	<b>34</b>

---

*Ce travail a été réalisé avec la collaboration de Florie Bonneau*



## 1.1 Le volant de badminton : trajectoire et aérodynamique

Le moyen de “communication” entre les joueurs passe par le volant. Ce projectile léger, varie de 4.74 à 5.50 grammes et possède 16 plumes d’oie ou de canard [Cooke, 2002, 1999]. La base du volant est en liège ou en plastique. Les premières apparitions du volant sont souvent identifiées dans des peintures d’époque (figure 1.1).

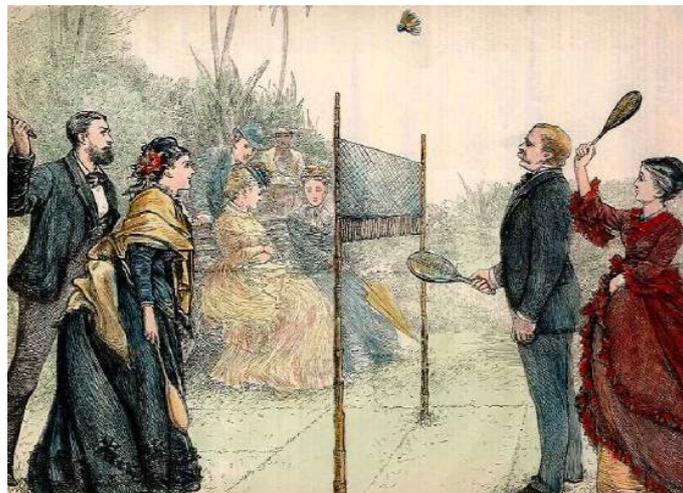


FIGURE 1.1 – Apparition du volant de badminton dans les années 1800

Il existe deux types de volant selon leurs usagers. Les pratiquants occasionnels ou encore les débutants utilisent des volants plastiques. Au fur et à mesure de la progression, le volant plume est davantage utilisé. Les industriels proposent trois types de volants dans le commerce :

- le volant avec tête et jupe en plastique : ce modèle est généralement utilisé par les joueurs occasionnels et les débutants en raison de sa légèreté et de sa résistance. Son inconvénient réside dans ses trajectoires davantage paraboliques ressemblant à celle d’une balle de tennis (figure 1.2a) ;
- le volant avec tête en liège et jupe en plastique : ce modèle est utilisé par les débutants en raison de sa longévité. Avec lui, le joueur obtient des trajectoires proches de celles obtenues avec des volants en plume (figure 1.2b) ;
- le volant avec tête en liège recouverte de cuir fin et jupe en plumes d’oie : ce modèle est souvent utilisé par les joueurs confirmés et en compétition officiel. Composé de 16 plumes de la même longueur (entre 62 et 70 cm) sont fixées sur

une base de liège de 25 à 28 mm de diamètre, à bout arrondi, il constitue un cercle d'un diamètre compris entre 58 et 68 mm. Les trajectoires du volant en plume d'oie sont atypiques et ne sont aucunement ressemblantes à celles d'une balle (figure 1.2c).

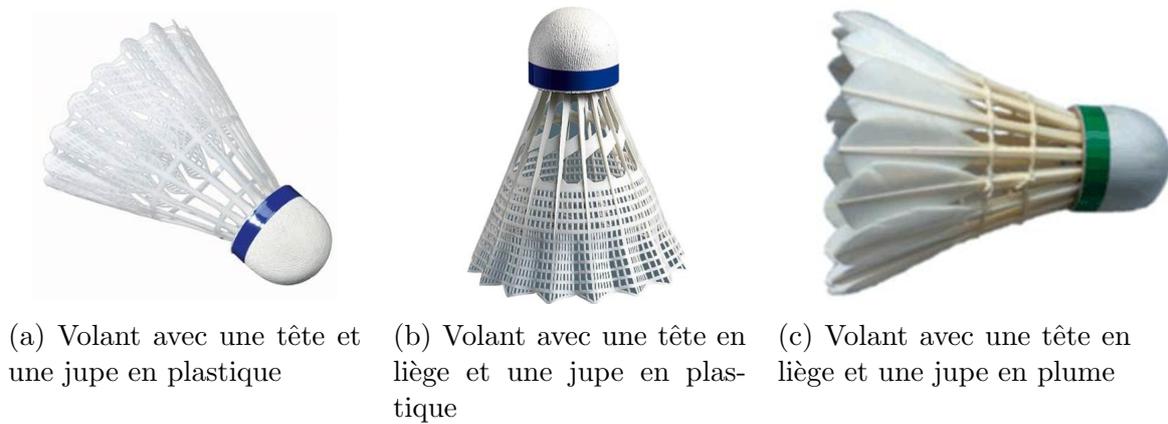


FIGURE 1.2 – Différents types de volants de badminton

### 1.1.1 Les particularités aérodynamiques du projectile

Le volant a de nombreuses particularités aérodynamiques qui lui confèrent des trajectoires atypiques comparées à celles d'autres de projectile [Laffaye, 2013]. Spécifiquement, les différentes forces aérodynamiques appliquées sur le volant sont d'environ 50 fois plus importantes que la simple force gravitationnelle lors d'un impact à très grande vitesse (figure 1.3).



FIGURE 1.3 – Application des différentes forces sur un volant

La force de résistance du mouvement du volant étant proportionnelle au carré de sa vitesse, d'après McCreary [2005] la position du volant peut être décrite par l'équation :

$$x(t) = v_{finale} [t - \frac{v_{finale}}{g} (1 - e^{-\frac{gt}{v_T}})] \quad (1.1)$$

où  $g$  est l'accélération due à la gravité

La position en fonction de la vitesse s'écrit :

$$x(v) = -\frac{v \cdot v_{finale}}{g} - \frac{V_T^2}{g} \ln[g(1 - \frac{v}{v_{finale}})] + \frac{v_{finale}^2}{g} \ln(g) \quad (1.2)$$

Dans le cas où la force est due à la résistance de l'air et qu'elle est proportionnelle à la vitesse du volant après impact avec la raquette, nous obtenons :

$$x(t) = \frac{v_{finale}^2}{g} \ln[\cosh(\frac{gt}{v_{finale}})] \quad (1.3)$$

en ajoutant la position en fonction de la vitesse, nous avons finalement :

$$x(v) = -\frac{v_{finale}^2}{2g} \ln[g(1 - (\frac{v}{v_{finale}})^2)] + \frac{v_{finale}^2}{2g} \ln(g) \quad (1.4)$$

Les volants plumes ont un plus faible coefficient de traînée à faible vitesse mais une valeur significativement plus élevée à grande vitesse. Les volants en plastique quant à eux montrent des tendances opposées (figure 1.4). Les trajectoires de ces derniers ont une plus grande portée (de plus de 10 %) [Cooke, 2002]. Le projectile en plume produit une fin de trajectoire “plus raide” qui est due à un coefficient de traînée significativement plus élevé [Alam *et al.*, 2009, 2010; Cohen *et al.*, 2014; Le Personnic *et al.*, 2011]. De plus, l'angle de la frappe et la vitesse angulaire initiale qui sont des variables pouvant influencer la trajectoire des volants [Chen *et al.*, 2009].

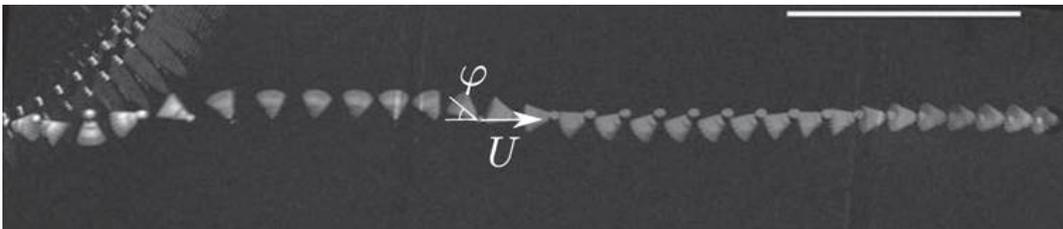


FIGURE 1.4 – Chronophotographie d'un volant en sortie de raquette selon Cohen *et al.* [2014]

En l'absence des forces aérodynamiques (force de frottement) appliquées sur le volant, nous pouvons obtenir une portée théorique du projectile. Un projectile projeté dans les airs est défini par la portée  $P$ . En négligeant les forces de frottement de l'air,

la portée dépend ainsi de la vitesse initiale ( $v_{initiale}$ ) et de l'angle de départ  $\alpha$ , selon McCreary [2005] :

$$P = \frac{(v_{initiale}^2 \sin 2\alpha)}{(g)} \quad (1.5)$$

Pour observer la place prédominante des forces aérodynamiques (force de frottement) appliquées sur le volant, nous les négligeons avec un volant partant avec un angle de  $45^\circ$  et à une vitesse de 79 m/s. Nous obtenons une trajectoire théorique de plus de 600 m [Laffaye, 2013]. En incluant les forces de frottement (soit cinquante fois supérieures aux forces gravitaires), la distance se réduit à 12 m soit quasiment la longueur d'un terrain de badminton [Cohen *et al.*, 2014; Darbois-Textier *et al.*, 2014; McCreary, 2005; Paestrel *et al.*, 1980; Tong, 2004].

### 1.1.2 Les différentes trajectoires du projectile

Chaque impact de volant avec la raquette est contraint par la loi de conservation de la quantité de mouvement et par des pertes énergétiques [Cohen *et al.*, 2014]. Selon les lois de la conservation, nous avons :

— Avant l'impact du volant avec la raquette

- M : masse de la raquette ;
- V : vitesse du volant ;
- m : masse du volant.

— Après l'impact du volant avec la raquette

- V' : vitesse de la raquette ;
- m' : masse du volant ;
- v' : nouvelle vitesse du volant ;
- e : coefficient de restitution.

Selon la loi de la conservation de la quantité de mouvement, nous obtenons :

$$MV = MV' + mv' \quad (1.6)$$

$$V' - v' = -eV \quad (1.7)$$

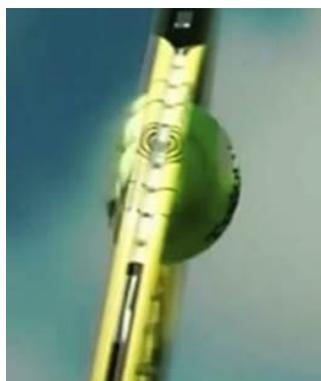
$$V' = V \frac{(m - em)}{(M + m)} \quad (1.8)$$

$$v' = V(1 + e) \frac{M}{M + m} \quad (1.9)$$

Le tableau 1.1 compare les différentes activités de raquette sur des valeurs standards obtenues avec des sportifs de haut niveau dans trois disciplines. Lors de l'impact entre le projectile (balle ou volant) et la raquette (figure 1.5), les vitesses des raquettes générées avant la frappe sont proches pour le tennis et le badminton (respectivement 40 m/s et 45 m/s) et inférieures pour le tennis de table (30 m/s).

Paramètre	Badminton	Tennis	Tennis de table
Coefficient de restitution	0.85	0.8	0.85
Masse raquette (M)	0.1	0.3	0.1
Masse projectile (m)	0.005	0.06	0.003
M/m	20	5	33
Vitesse raquette (v)	45	40	30
Vitesse raquette après (V')	41	28	28
Vitesse projectile (V')	79	50	52

TABLEAU 1.1 – Comparaison des coefficients de restitution dans les différents sports de raquette (Laffaye, 2013)



(a) Impact entre la raquette de tennis et la balle (b) Impact entre la raquette de badminton et le volant

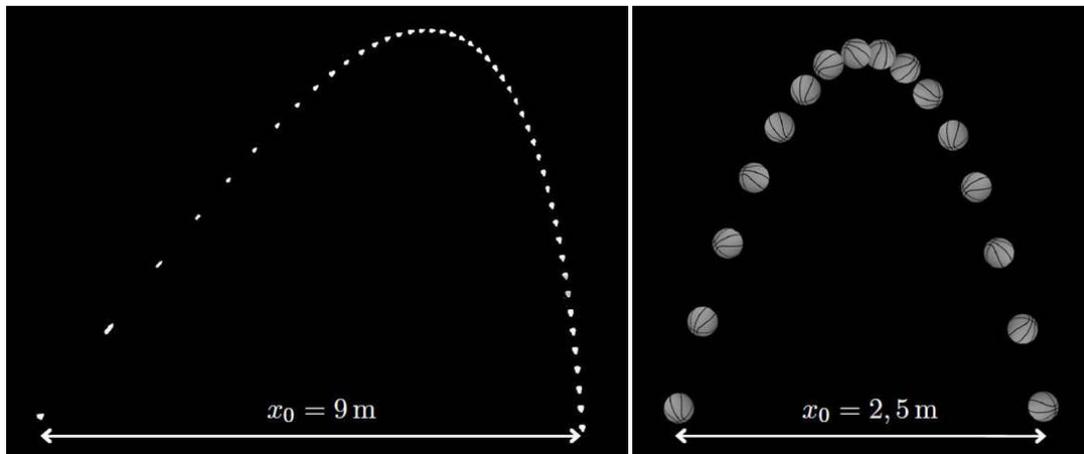
FIGURE 1.5 – Impact entre l'impacteur (raquette) et l'impacté (projectile)

Néanmoins après l'impact, cette même vitesse diminue en tennis (28 m/s) mais

reste quasi constante en badminton (41 m/s) et en tennis de table (28 m/s). La vitesse résultante du projectile est de 79 m/s soit près de  $\approx 300$  km/h en badminton, contre 50 m/s soit  $\approx 180$  km/h dans les deux autres sports [Laffaye, 2013]. Les valeurs records enregistrées sont de  $\approx 263$  km/h en tennis par l'Australien Samuel Groth et  $\approx 493$  km/h en badminton par l'Indonésien Tan Boon Heong [Yonex, 2013].

### 1.1.3 Trajectoire de volant après impact

Le volant génère d'importants coefficients de traînée et une trajectoire surprenante et atypique (figure 1.6a) [Alam *et al.*, 2009; Laffaye, 2013] avec une courbe asymétrique [Cohen *et al.*, 2014] complètement différente des trajectoires de balle (figure 1.6b). Cette distinction est caractérisée par le mur aérodynamique qui est produit quand le ratio de la vitesse du lancement (impact) sur la vitesse terminale est élevé. Ce ratio est d'environ 17.5 en badminton.



(a) Chronophotographie d'un volant et illustration du "mur aérodynamique" (b) Chronophotographie d'un ballon

FIGURE 1.6 – Trajectoire d'un ballon et d'un volant selon Cohen *et al.* [2014]

L'ensemble des forces amène une décélération en vol du volant qui est la plus importante de toutes les activités où il y a un projectile mis en jeu [Kitta *et al.*, 2011; Nakagawa *et al.*, 2012]. Ce ralentissement est fortement dû au coefficient de traînée aérodynamique qui est proportionnel au carré de la vitesse du volant (plus le volant sortira vite de la raquette, plus la résistance sera grande) à la densité de l'air (dépendant de la température, elle est de  $1.2\text{ kg.m}^3$  à  $20^\circ$  et passe à  $1.25\text{ kg.m}^3$  à  $10^\circ$ ) et à la

surface frontale du volant non déformable.

Les deux forces agissant sur le projectile après l'impact sont la masse et les forces de frottement. Dans le cas où les forces de frottement sont supérieures aux forces gravitaires, nous pouvons parler de sport dominé par l'aérodynamique. Le calcul de ces deux forces pour un volant donne :

Forces de frottement correspond à :

$$F_{frot} = \frac{1}{2}C_D\rho V^2 = 2.5N \quad (1.10)$$

avec  $\rho$  masse volumique du fluide,  $S$  aire du solide selon direction et  $C_D$  coefficient de traînée.

Forces gravitaires sont égales au poids :

$$P = mg = 0.05N \quad (1.11)$$

avec  $m$  masse de l'objet et  $g$  intensité de la pesanteur

Ratio :

$$\frac{F_{frot}}{P} = \frac{0.5}{0.05} = 50 \quad (1.12)$$

Selon [Alam et al. \[2009\]](#) et [Cooke \[1999\]](#), le coefficient de traînée aérodynamique est défini comme étant :

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A} \quad (1.13)$$

En l'impliquant avec le nombre de Reynolds permettant de mettre en avant le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses du projectile [[Nakagawa et al., 2012](#); [Paestrel et al., 1980](#)], nous obtenons :

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot d}{\mu} \quad (1.14)$$

La moyenne du coefficient de traînée pour un volant est compris entre 0.5 à 60 km/h et 0.6 à plus de 100 km/h [[Alam et al., 2009, 2010](#); [Cohen et al., 2014](#); [Cooke, 1999](#); [Laffaye, 2013](#)]. La dynamique d'envol est affectée par la déformation de la jupe du volant [[Kitta et al., 2011](#); [Nakagawa et al., 2012](#)]. Il est toutefois possible de négliger l'effet Magnus qui apparaît avant tout dans les activités de projection [[Hernandez,](#)

2002].

### 1.1.4 Simulation des trajectoires des volants

En connaissant les différentes vitesses du projectile en sortie de raquette et l'angulation, il est possible de "simuler" une trajectoire de volant [Cooke, 2002, 1999]. Les différents états linéaires quasi-stables et les équations rotationnelles orientent le mouvement du volant sur le plan  $x$  et  $y$  donné comme étant :

$$0 = m\ddot{x} + D \cos \theta + L \sin \theta \quad (1.15)$$

$$0 = m\ddot{y} + D \sin \theta - L \cos \theta + mg \quad (1.16)$$

$$0 = I_t\ddot{\beta} + c\dot{\beta} + \left| \frac{dM}{d\alpha} \right| \alpha \quad (1.17)$$

Le moment d'inertie du projectile( $I$ ) peut être déduit de l'équation en supposant qu'il existe une rotation sinusoidale :

$$I = \frac{mgR^2T^2}{(2\pi)^2b} \quad (1.18)$$

En connaissant l'ensemble des paramètres mécaniques, Cooke [2002] met en avant une gestion de simulation par ordinateur de la prédiction de la trajectoire du projectile. Les premières informations à recueillir sont le modèle du volant, la masse, la zone d'impact, l'angle initial, la hauteur, la vitesse, le temps d'envol, la température et la pression atmosphérique. Couplées avec un traitement des données des coefficients aérodynamiques et l'utilisation d'un logiciel "Spline" (pour la construction du graphique), et en utilisant la méthode de Runge-Kutta pour (répéter les trajectoires connues). Cooke [2002] parvient à simuler la trajectoire du volant.

### 1.1.5 Aérodynamisme du volant

Diverses études biomécaniques se sont intéressées à l'analyse du mouvement du joueur de badminton et au comportement du projectile : le volant [Bingqi et Zhiqiang, 2007; Bussmann *et al.*, 2000]. Pour réaliser l'ensemble de ces études, des caméras à haute-vitesse [Hsueh *et al.*, 2012; Tang *et al.*, 1995; Wei, 2000] ou d'autres instruments scientifiques ont été utilisés [Tang *et al.*, 1995; Teu *et al.*, 2005] afin de dévoiler les

détails de la performance.

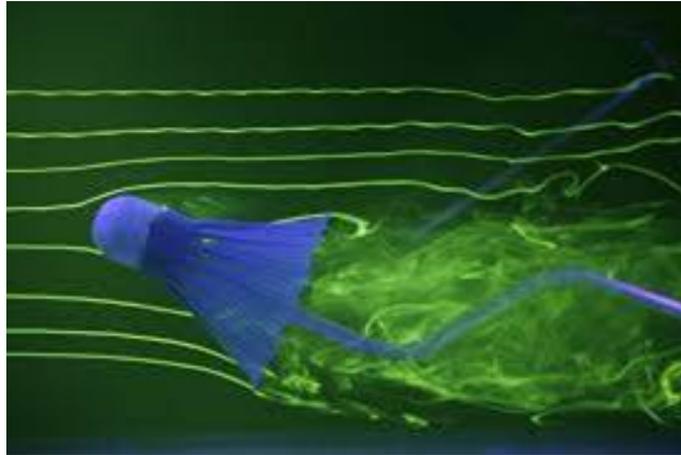


FIGURE 1.7 – Visualisation des filets d'air d'un volant, image provenant de Rob Bulmahn

La force aérodynamique appliquée sur le volant de badminton à haute vitesse est approximativement 50 fois supérieure à la force gravitationnelle lors d'un smash (figure 1.7). Cela montre la place importante des contraintes aérodynamiques dans cette activité sportive [Phomsoupha et Laffaye, 2015]. Lors d'une chute libre, le volant atteint 99 % de sa vitesse maximale à 1.84 secondes après être tombé de 9.2 mètres, avec une vitesse finale de 6.80 m/s Cohen *et al.* [2014]; Darbois-Textier *et al.* [2014]; McCreary [2005]; Paestrel *et al.* [1980]; Tong [2004] (figure 1.9).

De plus, la dynamique de vol est également affectée par la déformation de la jupe du volant [Kitta *et al.*, 2011; Nakagawa *et al.*, 2012]. Durant le smash, la vitesse du volant augmente linéairement avec le niveau d'expertise d'environ 30 m/s pour un néophyte à environ 70 m/s pour un expert [Phomsoupha et Laffaye, 2014].

Traditionnellement, les volants sont divisés en deux catégories que l'on peut retrouver dans le commerce : les volants à plume et les volants en plastique [Cooke, 2002, 1999], avec des propriétés aérodynamiques différentes. Les volants en plume ont un coefficient de traînée inférieur lors de vitesse faible et des valeurs significativement plus élevée à des vitesses importantes. A l'inverse, les volants en plastique ou synthétique montrent des tendances opposées et peuvent augmenter leur portée de plus de 10 % [Cooke, 2002]. L'angle de frappe et la vitesse angulaire initiale influence la trajectoire du volant [Chen *et al.*, 2009] (figure 1.4).

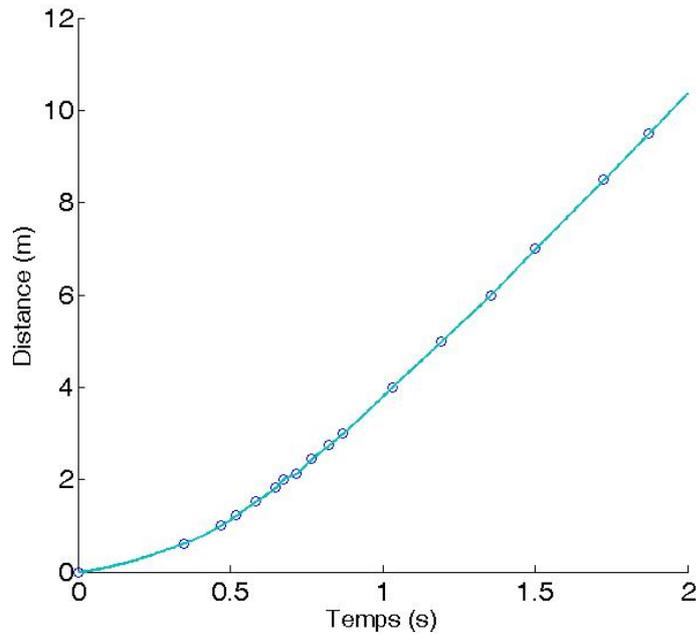


FIGURE 1.8 – Valeur expérimentale durant une chute libre d'un volant selon Paestrel *et al.* [1980]

## 1.2 Validation de deux matériels pour l'obtention des vitesses de projectiles

L'un des premiers facteurs de performance au tennis de table, au tennis, au football, au baseball et au badminton, est l'habileté à produire une grande vitesse durant une frappe ou un lancer. Le projectile peut être un objet (balle, volant...) ou un athlète (saut en longueur). La grande vitesse de projection est souvent corrélée avec une performance importante dans plusieurs sports [Laffaye *et al.*, 2012].



FIGURE 1.9 – Le titre obtenu par Tan Boon Heong pour le succès du projectile le plus rapide

En badminton, plusieurs études se sont intéressées à la vitesse du volant pour montrer des principes biomécaniques dans le but d'optimiser le mouvement [Gowitzke et Waddell, 1977; Waddell et Gowitzke, 2000]. Au cours d'un match, la plus grande vitesse est obtenue durant un smash. De plus, le smash est utilisé entre  $\approx 10$  à  $14$  % durant un match de badminton [Laffaye *et al.*, 2015], permet souvent de conclure l'échange [Rambely *et al.*, 2005b].

Dans ce contexte, l'évaluation de la vitesse du volant avec précision est un enjeu majeur dans le suivi de la performance du sportif. Pour enregistrer une telle vitesse, le traitement des images est le plus souvent utilisé. De plus, il est courant de se servir de ces vidéos dans les activités sportives comme l'analyse du mouvement, l'analyse de jeu [Laffaye *et al.*, 2015] et l'éducation physique [Nagasawa *et al.*, 2012]. Les informations recueillies par les scientifiques, permettent aux joueurs et aux entraîneurs d'améliorer et d'optimiser les performances [Nagasawa *et al.*, 2012; Takahashi et Kawahara, 2011].



FIGURE 1.10 – Chronophotographie d'un smash revers de Taufik Hidayat

Pour enregistrer la vitesse maximale du projectile, c'est-à-dire juste après le contact entre la raquette et le volant, les études utilisent généralement des caméras standards [Hsieh *et al.*, 2004; Hussain *et al.*, 2011a; Hussain et Arshad Bari, 2011; Hussain *et al.*, 2011b; Rambely et Wan Abas, 2008; Rambely *et al.*, 2005b; van den Tillaar et Etema, 2006; Wagner *et al.*, 2014]. Cependant, cette méthode révèle “deux faiblesses” principales. L'erreur de mesure dépend :

- du rapport de la vitesse de projection du volant sur le nombre d'images par

seconde et la résolution du système [Nagasawa *et al.*, 2012] ;

- du moment où la vitesse du volant est maximale, c'est-à-dire la plus proche du moment où le volant quitte la raquette.

Miller [2006] souligne que le temps de contact au moment de l'impact est compris entre 5 à 6 ms. En complément, Phomsoupha et Laffaye [2014] ont montré que la vitesse du volant suit une fonction logarithmique en fonction du temps, donnant :

$$vitesse = -9.2 \log(\text{temps}) + 2.4 \quad (1.19)$$

La vitesse du volant est divisée par deux après 5 ms juste après l'impact. La différence de vitesse entre les joueurs élites et experts est d'environ 10 m/s [Phomsoupha et Laffaye, 2014], alors que la précision d'une caméra à 50 Hz est proche de  $\approx 5$  m/s. Cela montre une grande imprécision lors de l'acquisition de la vitesse du volant. Cela souligne la grande difficulté d'enregistrer une vitesse de volant avec ces outils.

Cependant, pour obtenir une plus grande précision et pour résoudre le manque de résolution, plusieurs études utilisent des systèmes d'analyse du mouvement en 3D et des caméras à hautes vitesses [Domone *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2002; Jaitner et Wolf, 2007; Lee, 1993; Strohmeyer *et al.*, 2009; Tsai *et al.*, 2008, 2000, 2005, 2006; van den Tillaar *et al.*, 2013; Wagner *et al.*, 2014]. Les caméras à hautes vitesses permettent d'avoir l'évolution de la projection sur un plan, complétée par les caméras d'analyse du mouvement en 3D (figure 1.11). Ainsi, ces dernières caméras sont considérés dans notre étude comme étant le "gold standard" pour la capture de la vitesse. Néanmoins, ces dispositifs sont extrêmement onéreux pour les entraîneurs et leur utilisation est largement confinée aux laboratoires universitaires et aux structures sportives possédant de grands moyens financiers [Balsalobre-Fernández *et al.*, 2015]. De plus, ces instruments nécessitent l'utilisation de logiciels informatiques spécifiques, nécessitant un apprentissage complémentaire.

Les industriels tentent de répondre à ce problème en proposant des petits appareils mobiles, les centrales inertielle, incluant des accéléromètres couplés avec des gyroscopes à fixer sur le manche de la raquette, fournissant plusieurs informations aux sportifs. Les données sont ainsi rapidement accessibles pour l'utilisateur comme le nombre de frappe, la

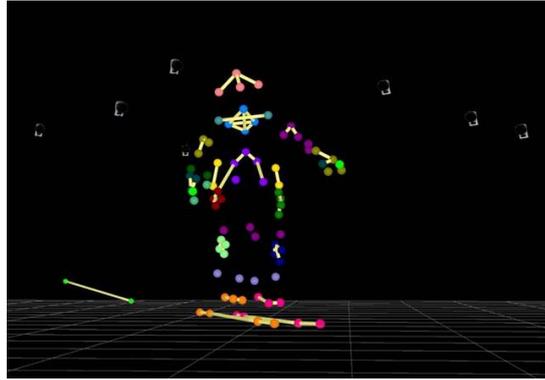


FIGURE 1.11 – Salle de capture de mouvement avec des caméras à haute vitesse

vitesse du projectile et les statistiques de jeu.

### 1.2.1 Objectif

Au cours de notre recherche scientifique, nous nous sommes rendu compte de l'absence d'études antérieures de validation d'une centrale inertielle couplé avec un smartphone ou un radar pour mesurer la vitesse d'un projectile (figure 1.12a). Ainsi, l'objectif de cette étude est d'analyser la validité et la fiabilité d'un radar (Doppler, Stalker Sport system, Texas, US) (figure 1.12b) et d'une centrale inertielle lié à une application (Zepp Tennis) pour mesurer la vitesse d'un projectile. L'ensemble des mesures est comparé avec un système de caméra à haute vitesse 3D de capture de mouvement (figure 1.12c), le système Vicon, que nous considérons comme le "gold standard" (Vicon Peak, Oxford, Royaume-Uni).



(a) Centrale inertielle couplé avec un smartphone



(b) Radar Doppler



(c) Caméra à haute vitesse de capture de mouvement

FIGURE 1.12 – Outils expérimentaux utilisés pour enregistrer et mesurer la vitesse

## 1.2.2 Protocole expérimental

### 1.2.2.1 Participants

Pour réaliser cette expérimentation, nous avons demandé à 34 joueurs de niveaux différents (débutants, intermédiaires et experts) de participer aux différents exercices à cette étude (tableau 1.2). Leur niveau d'expertise a été réalisé selon leur classement fédéral. Les joueurs ont été catégorisés selon le système de classement français (FFBad, 2016) : les débutant (aucun classement à P10), les intermédiaires (D9-R4) et les élites (N3-N1).

Tous les athlètes étaient physiquement en bonne santé et n'ont signalé aucune blessure durant tout le temps de l'étude. Avant de venir participer à l'expérience, les participants se sont abstenus de boire de l'alcool ou de boissons à base de café les dernières 24 heures et ne se sont pas alimentés durant les dernières 2 - 3 heures avant l'expérimentation. Cela afin de réduire au maximum tous les effets pouvant interférer dans l'expérimentation.

Variable	Débutant	Intermédiaire	Expert
Age (année)	24.5 (7.6)	21.1 (4.4)	24.4 (8.1)
Taille (cm)	182.3 (7.2)	179.9 (6.3)	167.9 (9.7)
Masse (kg)	76.5 (9.8)	72.8 (9.3)	74.3 (1.7)
Année de pratique (année)	0.2 (0.7)	4.1 (1.3)	10.6 (2.9)

TABLEAU 1.2 – Anthropométrie des joueurs lors de l'expérience

Le consentement éclairé de tous les sujets a été obtenu avant tous les tests, conformément à l'approbation du comité éthique local, adhérant aux derniers amendements de la Déclaration d'Helsinki.

### 1.2.2.2 Design de l'expérimentation

Toutes les expérimentations ont eu lieu à la même heure de la journée (10 à 12 h, à une température de 20.2 (2.1)°C et avec 54.3 (6.2) % d'humidité) pour enlever toute influence des conditions extérieures sur la performance. Avant le début de l'expérimentation, les composantes anthropométriques des participants ont été relevées à l'aide d'une balance à impédance.

Après avoir proposé un échauffement général de 10 minutes composé de course, d'étirement dynamique et de smash avec la raquette. Les participants pouvaient effectuer autant de fois qu'ils le souhaitaient la frappe du smash. Cela permettait de tester le matériel et d'avoir des instructions des expérimentateurs dans la réalisation du geste. La même raquette était utilisée durant toute l'expérimentation (Wilson Draco Blx ; 86 g ; 675 mm) avec une tension de 11 kg.

La raquette était équipée de six marqueurs, suivant le modèle proposé par [Kwan et al. \[2008\]](#) : sur le haut et le bas du manche, sur la tige de raquette et sur le haut, gauche et droite de la tête de raquette (figure 1.13). Les marqueurs réfléchissants placés sur la raquette avaient une masse comprise entre 1.2 - 2.4 g chacun, augmentant la masse totale de la raquette de 12.4 g (soit environ  $\approx 14$  % de plus que sa masse initiale).



FIGURE 1.13 – Raquette équipée de marqueurs réfléchissants

L'expérimentation s'est déroulée sur 2 sessions espacées au maximum de deux jours permettant ainsi d'observer la fiabilité et la validité de l'équipement. Les participants devaient réaliser 5 smashes entre-coupés de 30 secondes de récupération. Les joueurs avaient pour consigne de smasher le plus fort possible un volant accroché au plafond à l'aide d'un fil. Un marqueur réfléchissant de 14 mm de diamètre avait été apposé sur le bouchon du volant afin d'être perçu par les caméras quelque soit sa position. Une cible de 2 mètres sur 2 mètres était accrochée afin que les participants aient un secteur à viser [[Chelly et Denis, 2001](#)].

### 1.2.2.3 Équipements de mesure de vitesse

*Radar Doppler* : (Stalker Sport System, Texas, États-Unis) étalonné à une fréquence de 250 Hz et une précision d'environ 0.027 m/s selon les indications du constructeur. Le radar permet d'obtenir l'évolution de la vitesse et la vitesse maximale du volant durant chaque essai. Pour recueillir la vitesse, l'expérimentateur se situait à 2 mètres derrière le joueur dans l'axe de frappe de celui-ci à une hauteur de 2.50 mètres [Chelly et Denis, 2001].

*Centrale inertielle* : pour enregistrer la vitesse du volant avec l'application *Zepp Tennis*. Une monture est fixée sur le manche de la raquette dans laquelle le capteur est inséré (12.4 g). L'application a été conçue pour analyser la vitesse de la raquette et le potentiel de vitesse du projectile (balle et volant). L'application "Zepp Tennis" est disponible sur l'Apple Store (Apple Inc., USA) et sur le Google Play (Google Inc., USA).

*Caméra à haute vitesse ("golden-standard")* : enregistrant à l'aide de 9 caméras de captures de mouvements Vicon V8i (Vicon Peak, Oxford, UK) à une fréquence de 1000 Hz afin de mesurer la vitesse du volant. Le système Vicon est connecté à un ordinateur équipé d'un logiciel d'analyse et qui permet d'obtenir la vitesse maximale du volant et celle tout au long de l'action (Vicon Mouvement System Ltd., Royaume-Uni). Le système est considéré comme la référence pour analyser la validité de la vitesse entre les équipements. De plus, cela permet de comparer les erreurs de mesures avec les autres équipements.

### 1.2.2.4 Analyse statistique

Plusieurs analyses statistiques ont été réalisées afin de déterminer la fiabilité et la reproductibilité des smashes. Pour commencer notre analyse statistique, nous avons effectué des statistiques descriptives pour chaque essai et chaque participant. Toutes les données ont suivi la loi normale en se basant sur le test de Kolmogorov-Smirnov [Lilliefors, 1996]. Pour détecter les biais systématiques entre les essais, un test T de Student a été réalisé [Atkinson et Nevill, 1998]. Pour analyser la fiabilité des instruments entre les essais de mesures, l'*Intra-Classe Corrélation (ICC)* a été effectuée. Ces coefficients

ont été calculés comme étant  $ICC = 1 - (SEM/SD)^2$ , où  $SEM$  est l'erreur-type de la mesure et  $SD$  est l'écart type entre les sujets basé sur le nombre de degrés de liberté [Hopkins, 2007]. Le SEM a été obtenu en calculant ( $SEM = SD$  (différence des mesures inter-essai) /  $\sqrt{2}$ ). Un Blant-Altman a été créé afin d'analyser et d'évaluer la concordance entre les équipements [Bland et Altman, 1986].

Afin d'analyser la fiabilité de la centrale inertielle et du radar lors des mesures de smash de chaque participant, Coefficient de Corrélation (CV) a été réalisé selon ( $CV = (SEM/moyenne)/100\%$ ). La moyenne prend en considération l'ensemble des participants et tous les essais [Atkinson et Nevill, 1998; Hopkins, 2000]. Pour connaître la fiabilité de notre échantillon, le coefficient de corrélation de Pearson a été effectué ( $R$ ). De plus, un test d'hétéroscédasticité a été réalisé afin d'observer la variance des erreurs d'un équipement. Afin qu'il ne soit pas identique selon l'ensemble des variables, il sera confirmé à l'aide d'un test de White [White, 1980].

La validité des résultats a été évaluée en comparant la moyenne des essais effectués avec la performance maximale mesurée entre les deux instruments. Les mesures statistiques sont similaires à celles utilisées afin d'évaluer la fiabilité. À partir nos résultats, nous avons effectué un test T de Student pour les échantillons appariés (biais systématique), entre les différences des systèmes en moyenne (la validité en unité brute et remise en pourcentage) et le CV (en pourcentage).

Sur cette base, la fiabilité et la validité des mesures ont été considérées comme faibles ( $< 0.4$ ), justes ( $0.4$  à  $0.75$ ) et bonnes ( $> 0.75$ ) selon les valeurs des ICC [Portney et Watkins, 2009]. La fiabilité et la validité absolues ont été considérées comme adéquates quand les valeurs du CV étaient égales ou inférieures à  $-10\%$  [Stokes, 1985]. Tous les calculs statistiques ont été réalisés en utilisant le logiciel Statistica 10 (StatSoft Inc., Tulsa, OK); Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corp., Redmont, WA, USA) et le logiciel R (www.r-project.org). Le niveau de significativité a été fixé à  $p < 0.05$  [Cohen, 1988].

## 1.2.3 Résultats

### 1.2.3.1 Fiabilité des instruments

La vitesse de chaque frappe et la moyenne entre chaque essai ont été reportés sur le tableau 1.3 pour les trois instruments.

Instrument		Novice	Intermédiaire	Expert
Radar	Essai 1	43.7 (3.3)	50.5 (5.2)	55.0 (2.7)
	Essai 2	41.9 (2.1)	48.8 (4.4)	54.9 (4.4)
	$\delta$ (%)	4.1	3.5	0.3
Centrale inertielle	Essai 1	44.3 (3.9)	52.9 (3.2)	59.5 (5.2)
	Essai 2	45.2 (3.5)	52.6 (5.4)	60.9 (6.3)
	$\delta$ (%)	1.9	-0.6	2.4
Caméra à haute vitesse	Essai 1	44.4 (4.0)	51.8 (4.4)	62.1 (3.3)
	Essai 2	44.3 (3.1)	50.1 (2.8)	62.5 (5.8)
	$\delta$ (%)	-0.3	-3.2	0.6

Note : Moyenne (ecart type) de chaque essai, et différence obtenue entre les essais ( $\delta$ , en %)

TABLEAU 1.3 – Vitesse du volant selon le radar, la centrale inertielle et la caméra à haute vitesse

Les valeurs de l'ICC et du CV, spécifiques à la fiabilité des différents tests sont reportées sur le tableau 1.4 pour les différents instruments. Les moyennes des ICC sont respectivement de 0.856 (0.048) (compris entre 0.80 - 0.88), 0.831 (0.045) (compris entre 0.78 - 0.86) et 0.863 (0.044) (compris entre 0.82 - 0.93) pour le radar, la centrale inertielle et la caméra à haute vitesse. Les valeurs moyennes des différents CV sont 7.6 (1.7) % (compris entre 6.4 - 9.5), 8.8 (0.6) % (compris entre 8.1 - 9.3) et 7.5 (0.3) % (compris entre 7.3 - 7.9). Les trois systèmes montrent une bonne fiabilité et une adéquation fiable dans l'obtention de la vitesse du projectile (tableau 1.4).

Instrument		Novice	Intermédiaire	Expert
Radar	ICC	0.823	0.881	0.886
	CV (%)	6.5	9.5	6.4
Centrale inertielle	ICC	0.850	0.780	0.863
	CV (%)	8.1	9.0	9.3

Caméra à haute vitesse	ICC	0.913	0.828	0.848
	CV (%)	7.9	7.3	7.4

Note : ICC < 0.75 et CV > 10 % sont en italique et représentent la faible reproductibilité

TABLEAU 1.4 – Fiabilité du matériel à travers le coefficient de corrélation intra-classe relatif et le coefficient de variation absolue obtenu à l'aide du radar, de la centrale inertielle et du système de caméra à haute vitesse

### 1.2.3.2 Validité des instruments

La moyenne des deux essais est présentée dans le tableau 1.5 pour chaque instrument. Il n'y a pas de différence significative observée dans la vitesse du volant entre chaque instrument. Cependant, la caméra à haute vitesse enregistre des vitesses plus importantes chez l'expert (tableau 1.5).

Instrument	Novice	Intermédiaire	Expert
Radar (m/s)	42.2 (3.9)	49.5 (4.8)	55.1 (5.6)
Centrale inertielle (m/s)	44.6 (3.4)	52.8 (3.7)	60.3 (4.6)
Caméra à haute vitesse (m/s)	43.5 (2.9)	51.0 (4.8)	62.1 (3.5)
Radar / caméra à haute vitesse	-3.1	-2.7	-2.6
Centrale inertielle / caméra à haute vitesse	2.3	3.4	-2.8

Note : La moyenne (écart-type) pour les deux essais combinés à chaque test pour chaque instrument, la différence entre la caméra à haute vitesse et les deux autres instruments ( $\delta$  en %)

\* $p < 0.05$ , différence significative entre la caméra à haute vitesse et le radar ou le capteur de mouvement

TABLEAU 1.5 – Vitesse du volant obtenue avec le radar, la centrale inertielle et la caméra à haute vitesse

L'ICC et le CV décrivent une validité dans l'obtention de la vitesse de projectile utilisant la caméra à haute vitesse, comparée à celle obtenue avec le radar et la centrale inertielle (tableau 1.6). La valeur absolue de l'ICC entre le radar et la centrale inertielle est globalement fiable en les comparant avec la caméra à haute vitesse (0.757 (0.207) et 0.866 (0.029), respectivement). Le CV montre une forte adéquation (12.5 (1.99) % et 12.1 (0.46) %).

Instrument		Novice	Intermédiaire	Expert
Radar / caméra à haute vitesse	ICC	0.753	0.855	0.896
	CV (%)	<i>13.1</i>	<i>12.0</i>	<i>6.4</i>
Centrale inertielle / caméra à haute vitesse	ICC	0.893	0.835	0.871
	CV (%)	<i>12.7</i>	<i>11.9</i>	<i>11.9</i>

Note : ICC < 0.75 et CV > 10 % sont en italique et représentent la faible reproductibilité

TABLEAU 1.6 – Validité du matériel à travers le coefficient de corrélation intra-classe relatif et le coefficient de variation absolue obtenu à l'aide du radar, de la centrale inertielle et du système de caméra à haute vitesse

### 1.2.4 Discussion

L'intérêt de cette étude est de pouvoir analyser la validité et la fiabilité des résultats entre les différents instruments, l'accéléromètre et la centrale inertielle (*Zepp Tennis*) avec le radar (*Radar Doppler*). Nos résultats montrent que le radar et la centrale inertielle sont fiables, cependant le radar sous-estime la vitesse par rapport aux deux autres instruments et plus particulièrement pour les experts. Ainsi, le radar et la centrale inertielle peuvent être considérés comme des systèmes fiables pour obtenir la vitesse du volant lors d'un smash en badminton allant du débutant à l'expert. Néanmoins, le radar semble ne pas avoir la meilleure validité lors de l'obtention de la vitesse chez les experts.

La littérature spécialisée recommande fortement l'utilisation de plusieurs paramètres statistiques afin de quantifier la fiabilité des mesures [Atkinson et Nevill, 1998]. Dans notre étude, tous les indicateurs statistiques impliquent une grande fiabilité dérivant de 3 systèmes différents. Les différentes valeurs et techniques entre les essais et les tests sont des variations normales attendues quelque soit le type de test. Ainsi, il est important d'analyser la reproductibilité des mesures afin de déterminer les différences et les variations de la performance [Gindre *et al.*, 2016].

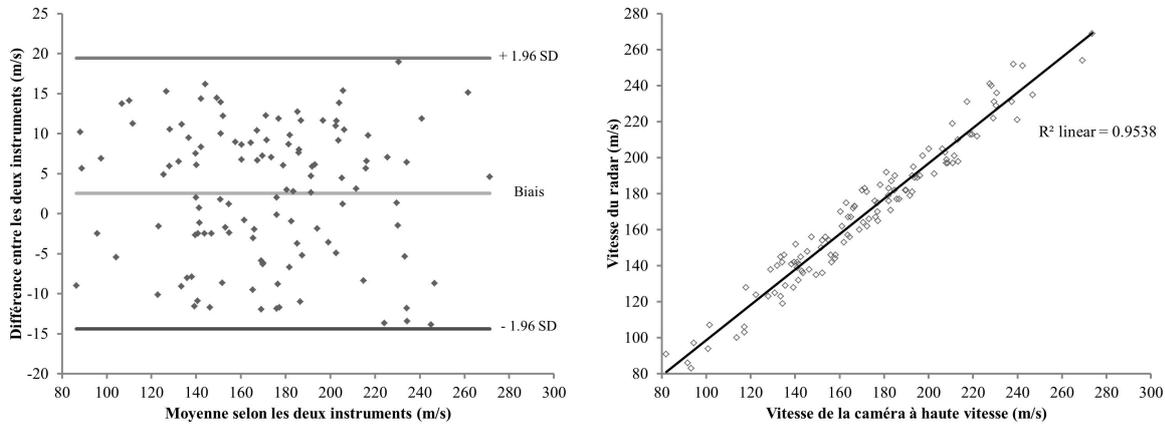
Nos résultats sur le radar nous montrent que l'ICC entre les différents essais obtenus ont des valeurs supérieures à 0.800 et en dessous de 10 % lors du calcul de la CV. Le

contact entre la tête de raquette et le volant est extrêmement proche, pouvant amener des erreurs de mesure entre l'enregistrement de la vitesse de la raquette et du volant. Cependant, [Rambely \*et al.\* \[2005a\]](#) soulignent que la vitesse du volant est plus importante que celle de la raquette. En ce qui concerne la centrale inertielle, l'ICC entre les essais montre des valeurs au-dessus de 0.780 et en-dessous de 10 % lors du calcul de CV. Ces résultats tendent à mettre en évidence que le positionnement du dispositif ou la complexité du mouvement (combinaison entre la pronation radio-ulnaire et l'extension de l'avant-bras) n'influencent pas la reproductibilité de l'accéléromètre. La reproductibilité des enregistrements des différentes vitesses pendant le smash en utilisant soit le radar, soit la centrale inertielle est satisfaisante. Ainsi, les entraîneurs et les joueurs peuvent faire confiance aux enregistrements obtenus par ces deux instruments.

Ainsi, le matériel utilisé permet d'obtenir des vitesses identiques selon une base qui leur est propre. Cependant, la validité des valeurs est primordiale. En comparant la vitesse obtenue par le radar / la caméra à haute vitesse et la centrale inertielle / la caméra à haute vitesse, les résultats montrent une validité "juste". En moyenne le radar, surestime la vitesse du volant de +6.5 %, alors que la centrale inertielle donne des valeurs assez proches ( $\approx 0.5$  %) par rapport à la caméra à haute vitesse. Ces résultats montrent que les différences inter-instruments amènent des recueils de vitesses différents. Les cliniciens et les scientifiques doivent être conscients des différences inter-instruments, particulièrement dans la comparaison entre les études laboratoires ou cliniques, et l'acquisition de nouveaux équipements dans le but de quantifier la vitesse d'un projectile.

Le radar et la centrale inertielle ont montré une forte validité et une forte fiabilité pour mesurer la vitesse du projectile lors d'un smash en badminton en comparaison avec la caméra à haute vitesse. Toutefois, il est important de souligner que les performances liées à la grande vitesse chez l'expert ne sont pas fiables. Lors de l'analyse de la fiabilité du radar et de la centrale inertielle, les résultats montrent des valeurs proches de celles obtenues avec la caméra à haute vitesse, en dépit des différences de fréquence d'échantillonnage (figure 1.14). Par ailleurs, les données du radar et de la centrale inertielle ont montré selon le Bland-Altman que les valeurs sont proches des valeurs obtenues à la caméra à haute vitesse (figure 1.15). Cela représente un haut

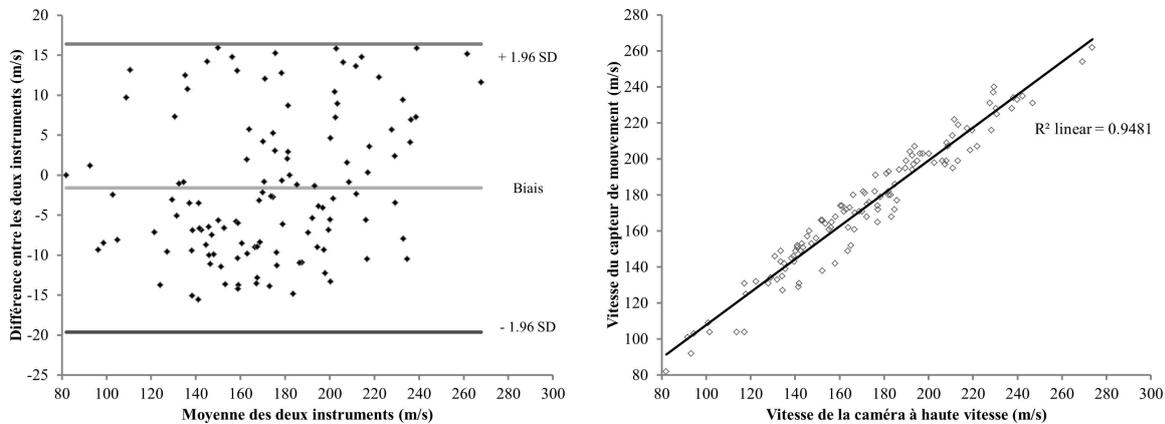
niveau de concordance entre les instruments [Bland et Altman, 1986]. De plus, la centrale inertielle a tendance à surévaluer les valeurs de vitesse à l'inverse du radar qui a tendance à les diminuer lorsqu'on les compare avec la caméra à haute vitesse.



(a) Différence des vitesses le radar et la caméra à haute vitesse

(b) Corrélation entre le radar et la caméra à haute vitesse

FIGURE 1.14 – Blant-Altman entre le radar et la caméra à haute vitesse



(a) Différence des vitesses la centrale inertielle et la caméra à haute vitesse

(b) Corrélation entre la centrale inertielle et la caméra à haute vitesse

FIGURE 1.15 – Blant-Altman entre le radar et la caméra à haute vitesse

Au cours de nos lectures scientifiques, nous n'avons pas trouvé d'étude comparant différents instruments permettant de mesurer la vitesse d'un projectile et une caméra à haute vitesse. Cependant, plusieurs études utilisent ces caméras, qui semblent être le meilleur moyen d'enregistrer et par la suite analyser la vitesse du projectile. Elles permettent d'obtenir des valeurs spécifiques donnant la vitesse du volant durant la frappe et le temps de contact entre l'impacteur et l'impacté ou le lanceur et le projectile. Pour le moment, les systèmes mesurant avec précision la vitesse d'un projectile se font

avec des caméras à hautes vitesses dans des laboratoires ou des structures privées. À la différence des caméras commercialisées enregistrant à environ 60 Hz, les caméras à hautes vitesses enregistrent entre 500 à 2000 Hz. Le risque avec une caméra standard est de ne pas enregistrer la plus grande vitesse. Cependant, les avancées technologiques vont bientôt permettre d'intégrer de plus grandes fréquences d'enregistrements dans les prochaines caméras [Balsalobre-Fernández *et al.*, 2015]. Il est aussi prévu que certains smartphones soient équipés de caméra de 250 Hz (Apple Inc., USA).

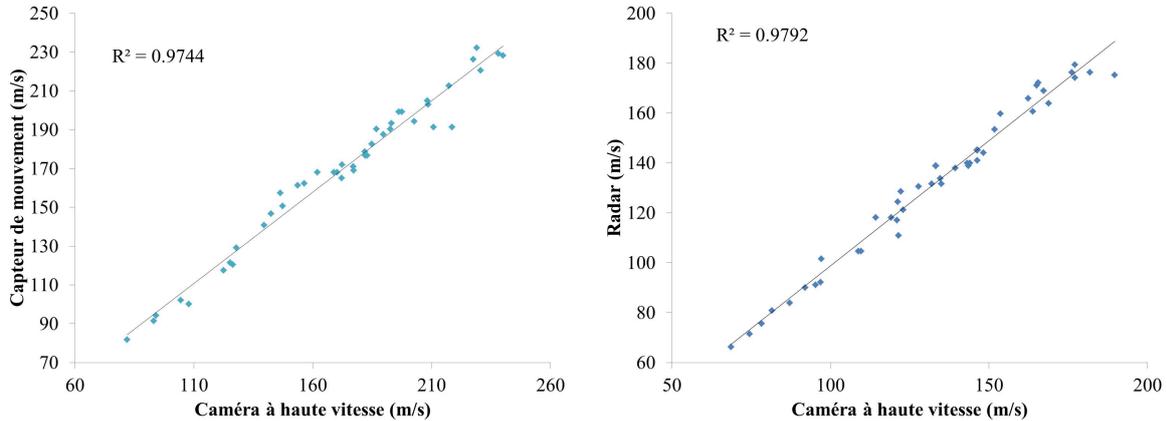
Précédemment, nous avons vu que les instruments semblaient permettre d'obtenir des vitesses fiables et constantes dans le temps. Cependant, des limites doivent être soulignées. En premier lieu, l'inconvénient majeur de la centrale inertielle est qu'elle pourrait ne pas enregistrer la vitesse du projectile. Il semblerait qu'à partir d'une certaine vitesse maximale, dans les environs de 325 km/h (soit  $\approx 95$  m/s), le dispositif ne puisse enregistrer la vitesse du volant. Ce matériel semble être capable de mesurer les vitesses pour toute une population de joueurs, incluant les experts, mais n'est pas dans la capacité de fournir une information aux joueurs élites. Cependant, un des points forts de ce matériel est l'absence d'expérience préalable pour l'utiliser.

Le radar a aussi des limites. Cet instrument composé à la fois d'un émetteur et d'un récepteur, émet un signal qui se reflète sur tous les objets se trouvant dans son champ d'action. Pour obtenir la vitesse, le radar reçoit le signal et utilise le principe de l'effet Doppler. Néanmoins, l'obtention de la vitesse est l'inconvénient majeur. L'alignement du radar doit être situé dans l'angle d'inclinaison du plan sagittal afin d'enregistrer la vitesse que l'on souhaite. Au cours de notre expérimentation, environ  $\approx 40$  % des essais n'ont pas pu être recueillis. Ainsi, l'orientation joue un rôle important dans le recueil de la performance. De plus, une expérience est nécessaire afin de pouvoir enregistrer correctement la vitesse qui n'est pas limitée comme la centrale inertielle à une vitesse maximale.

Au cours de cette étude, nous avons pu voir que le radar et la centrale inertielle donnaient des vitesses différentes que les valeurs obtenues par notre référentiel. Afin de pouvoir corriger ces valeurs, il est possible de tenir compte d'une équation linéaire pour chaque matériel :

$$v_{\text{caméra}} = 0.9705 * v_{\text{radar}} + 2.0971 \quad (1.20)$$

$$v_{\text{caméra}} = 1.0381 * v_{\text{accéléromètre}} - 2.2872 \quad (1.21)$$



(a) Correction des valeurs pour la centrale inertielle

(b) Correction des valeurs pour le radar

FIGURE 1.16 – Correction des valeurs pour chaque matériel

L'erreur intra-session est exempte d'erreurs méthodologiques et peut être considérée comme une "variation intrinsèque". Elle a servi de base appropriée pour les comparaisons, en restant indépendante des autres sources d'erreur. La fiabilité intra-session de la performance du projectile est extrêmement importante. Il faut veiller à ce que les différences observées entre les essais de tests, ne soient pas dues à un biais systématique, comme l'effet d'apprentissage, la fatigue ou l'erreur aléatoire en raison d'une éventuelle variation biologique ou mécanique. Cette variable est habituellement causée par l'état émotionnel des participants entre les épreuves et son niveau d'adaptation avec le système de mesure.

La capacité à évaluer la vitesse du projectile dans les différents sports de raquette est important dans le domaine de l'identification des talents et de la performance sportive. Les résultats de notre étude montrent que l'observation de la vitesse du projectile peut être réalisée à partir de plusieurs instruments. La caméra à haute vitesse est le matériel le plus performant, cependant, il est aussi le plus coûteux et le moins transportable. La centrale inertielle, moins chère peut être orientée vers les différents sports de raquette et le golf. Quant au radar, il convient pour les sports de lancer de projectile comme le

football, le volley-ball. Tous les matériels utilisés dans cette étude ont des avantages et des inconvénients. Ces travaux permettent de valider l'utilisation de ces instruments par les entraîneurs et les joueurs souhaitant analyser leur habileté à générer une vitesse d'une manière valide et économique.

## 1.3 Références

- ALAM, F., CHOWDHURY, H., THEPPADUNGPORN, C. et SUBIC, A. (2009). Aerodynamic properties of badminton shuttlecock. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 4(3):266–272. [11](#), [14](#), [15](#)
- ALAM, F., CHOWDHURY, H., THEPPADUNGPORN, C. et SUBIC, A. (2010). Measurements of aerodynamic properties of badminton shuttlecocks. *Procedia Engineering*, 2(2):2487–2492. [11](#), [15](#)
- ATKINSON, G. et NEVILL, A. M. (1998). Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. *Sports Medicine*, 26(4):217–238. [24](#), [25](#), [28](#)
- BALSALOBRE-FERNÁNDEZA, C., GLAISTERB, M. et LOCKEYB, R. A. (2015). The validity and reliability of an iPhone app for measuring vertical jump performance. *Journal of Sports Science*, 33(15):1574–1579. [20](#), [31](#)
- BINGQI, C. et ZHIQIANG, W. (2007). A statistical method for analysis of technical data of a badminton match based on 2D seriate images. *Tsinghua Science and Technology*, 12(5):594–601. [16](#)
- BLAND, J. M. et ALTMAN, D. G. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet*, 1(8476):307–310. [25](#), [30](#)
- BUSSMANN, J. B., HARTGERINK, I., VAN DER WOUDE, L. H. et STAM, H. J. (2000). Measuring physical strain during ambulation with accelerometry. *Medicine and Sciences in Sports Exercice*, 32(8):1462–1471. [16](#)
- CHELLY, S. M. et DENIS, C. (2001). Leg power and hopping stiffness : relationship with sprint running performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(2):326–333. [23](#), [24](#)
- CHEN, L. M., PAN, Y. H. et CHEN, Y. J. (2009). A study of shuttlecock's trajectory in badminton. *Journal of Sports Science and Medicine*, 8:657–662. [11](#), [17](#)
- COHEN, C., DARBOIS-TEXIER, B., BRUNEL, E., QUÉRÉ, D. et CLANET, C. (2014). The aerodynamic wall. *Proceedings of the Royal Society*, 470:1–20. [11](#), [12](#), [14](#), [15](#), [17](#), [III](#)

- COHEN, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavior sciences*. Hillsdale, Lawrence Erlbaum. 25
- COOKE, A. (2002). Computer simulation of shuttlecock trajectories. *Sports Engineering*, 5(2):93–105. 9, 11, 16, 17
- COOKE, A. J. (1999). Shuttlecock aerodynamics. *Sports Engineering*, 2(2):85–96. 9, 15, 16, 17
- DARBOIS-TEXIER, B., COHEN, C., DUPEUX, G., QUÉRÉ, D. et CLANET, C. (2014). On the size of sports fields. *New Journal of Physics*, 16:1–13. 12, 17
- DOMONE, S., WHEAT, J., CHOPPIN, S., HAMILTON, N. et HELLER, B. (2012). Wavelet based de-noising of non stationary kinematic signals. In *30th Annual Conference of Biomechanics in Sports*, numéro 44, pages 376–379. 20
- GINDRE, C., LUSSIANA, T., HEBERT-LOSIER, K. et MORIN, J. (2016). Reliability and validity of the Myotest® for measuring running stride kinematics. *Journal of Sports Science*, 34(7):664–670. 28
- GOWITZKE, B. A. et WADDELL, D. B. (1977). The contributions of biomechanics in solving problems in badminton stroke production. In *International Coaching Conference*. 19
- HERNANDEZ, M. A. G. (2002). Aerodynamics performances in sports. *ISBS*, pages 253–255. 15
- HOPKINS, W. G. (2000). Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Medicine*, 1:1–15. 25
- HOPKINS, W. G. (2007). A spreadsheet for analysis of straightforward controlled trials. *Sportscience*, Available at : [sportsci.org/jour/03/wghtrials.htm](http://sportsci.org/jour/03/wghtrials.htm). 25
- HSIEH, C. C., WONG, T. L., WANG, J. E., CHUNG, M. J. et WANG, J. C. (2004). The effect of two different weighted badminton rackets about velocity and torque when outstanding badminton players was performing smash movement. In *22 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 462–464. 19

- HSUEH, Y. C., CHEN, Y. Y., PAN, K. M. et TSAI, C. L. (2012). Biomechanical analysis of badminton forehand net shots. *In 30th Annual Conference of Biomechanics in Sports*, numéro 204, pages 256–259. 16
- HUANG, K. S., SHAW-SHIUN, C. et TSAI, C. L. (2002). Kinematic analysis of three different badminton backhand overhead strokes. *In International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 200–202. 20
- HUSSAIN, I., AHMED, S., MOHAMMAD, A., KHAN, A. et ARSHAD BARI, M. (2011a). Videographical analysis of short service in badminton. *Journal of Education and Practise*, 2(2):1–6. 19
- HUSSAIN, I. et ARSHAD BARI, M. (2011). Kinematical analysis of forehand and backhand smash in badminton. *Innovative Systems Design and Engineering*, 2(7):20–26. 19
- HUSSAIN, I., PAUL, Y. et BARI, M. A. (2011b). Videographical analysis of drop and cut shot in badminton. *African Journal Physical, Health Education, Recreation and Dance*, 17(4):859–864. 19
- JAITNER, T. et WOLF, G. (2007). Analysis of badminton smash with a mobile measure device based on accelerometry. *In XXV ISBA Symposium vol 20*, pages 282–284. 20
- KITTA, S., HASEGAWA, H., MURAKAMI, M. et OBAYASHI, S. (2011). Aerodynamic properties of a shuttlecock with spin at high Reynolds number. *Procedia Engineering*, 13:271–277. 14, 15, 17
- KWAN, M., de ZEE, M. et RASMUSSEN, J. (2008). Dynamic effects of badminton racket compliance. *Journal of Biomechanics*, 41(1):88. 23
- LAFFAYE, G. (2013). *Comprendre et progresser au Badminton*. Sport Pratique. 10, 12, 14, 15
- LAFFAYE, G., DEBANNE, T. et A, C. M. (2012). Is the ball velocity dependent on expertise? A multidimensional study in handball. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 12:629–642. 18

- LAFFAYE, G., PHOMSOUPHA, M. et DOR, F. (2015). Changes in the game characteristics of a badminton match : a longitudinal study through the Olympic Game finals analysis in men's singles. *Journal of Sports Science and Medicine*, 14:584–590. [19](#)
- LE PERSONNIC, J., ALAM, F., LE GENDRE, L., CHOWDHURY, H. et SUBIC, A. (2011). Flight trajectory simulation of badminton shuttlecocks. *Procedia Engineering*, 13: 344–349. [11](#)
- LEE, B. K. (1993). The effects of the kinematic link principle on performance. In *11 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 239–242. [20](#)
- LILLIEFORS, H. W. (1996). On the Kolmogorov-Sminnov test for normality with mean and variance unknown. *Journal of the American Statistical Association*, 62:399. [24](#)
- MCCREARY, K. M. (2005). A study of the motion of a free falling shuttlecock. *Wooster Physics Junior Thesis*, pages 1–5. [10](#), [12](#), [17](#)
- MILLER, S. (2006). Modern tennis rackets, balls, and surfaces. *British journal of sports medicine*, 40(5):401–5. [20](#)
- NAGASAWA, M., HATORI, Y., KAKUTA, M., HAYASHI, T. et SEKINE, Y. (2012). Smash motion analysis for badminton from image. *Proceedings of the IEEJ Image Electronics and Visual Computing Workshop*, pages 1 – 8. [19](#), [20](#)
- NAKAGAWA, K., HASEGAWA, H., MURAKAMI, M. et OBAYASHI, S. (2012). Aerodynamic properties and flow behavior for a badminton shuttlecock with spin at high Reynolds numbers. *Procedia Engineering*, 34:104–109. [14](#), [15](#), [17](#)
- PAESTREL, M., LYNCH, R. et ARMENTI, A. (1980). Terminal velocity of a shuttlecock in vertical fall. *American Journal of Physics*, 48(7):511–513. [12](#), [15](#), [17](#), [18](#), [III](#)
- PHOMSOUPHA, M. et LAFFAYE, G. (2014). Shuttlecock velocity during a smash stroke in badminton evolves linearly with skill level. *Computer methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 17(Suppl 1):140–141. [17](#), [20](#)
- PHOMSOUPHA, M. et LAFFAYE, G. (2015). The science of badminton : game characteristics, anthropometry, physiology, visual fitness and biomechanics. *Sports Medicine*, 45(4):473–495. [17](#)

- PORTNEY, L. G. et WATKINS, M. P. (2009). *Foundations of clinical research : applications to practice*. N.J : Pearson/Prentice Hall, upper sadd édition. 25
- RAMBELY, A. S., OSMAN, N. A. A., USMAN, J. et WAN ABAS, W. A. B. (2005a). The contribution of upper limb joints in the development of racket velocity in the badminton smash. *In 23 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 422–426. 29
- RAMBELY, A. S. et WAN ABAS, W. A. B. (2008). Contact time and take-off speed relationship in determining height of jump in jumping badminton smash. *In 26 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 660–663. 19
- RAMBELY, A. S., WAN ABAS, W. A. B. et YUSOF, S. (2005b). The analysis of the jumping smash in the game of badminton. *In 23 International Symposium on Biomechanics in Sports*, numéro 1, pages 671–674. 19
- STOKES, M. (1985). Reliability and repeatability of methods for measuring muscle in physiotherapy. *Physiotherapy Theory and Practice*, 1(2):71–76. 25
- STROHMEYER, H. S., ARMSTRONG, C., LITVINSKY, Y., NOONEY, R., MOORE, J. et SMITH, K. (2009). Intersegmental coordination differences between beginning performers executing a badminton smash for accuracy of velocity. *In 27 International Conference on Biomechanics in Sports*. 20
- TAKAHASHI, H. et KAWAHARA, T. (2011). Conditioning in multi-support project. *The Journal of Japanese Society of Clinical Sports Medicine*, 19(2):195. 19
- TANG, H. P., ABE, K., AE, M. et KATOH, K. (1995). Three-dimensional cinematographic analysis of the badminton forehand smash : movements of the forearm and hand. *In Science and Racket Sports*. E. and F.N. Spon, Cambridge. 16
- TEU, K. K., KIM, W., TAN, J. et FUSS, F. K. (2005). Using dual Euler angles for the analysis of arm movement during the badminton smash. *Sports Engineering*, 8(3):171–178. 16
- TONG, G. F. (2004). *Mechanics analysis of a shuttlecock terminal velocity*. Thèse de doctorat, National Kaohsiung Normal University. 12, 17

- TSAI, C. L., HSUEH, Y. C., PAN, K. M. et CHANG, S. S. (2008). Biomechanical analysis of different badminton forehand overhead strokes of Taiwan elite femal players. *In 26 International Symposium on Biomechanics in Sports, Conference, Coaching and Sports Performance*, pages 719–722. [20](#)
- TSAI, C. L., HUANG, C., LIN, D. C., CHENG, C. C. et LAI, C. M. (2000). Biomechanical analysis of the upper extremity in three different badminton overhead strokes. *In 18 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 35–38. [20](#)
- TSAI, C. L., YANG, C. C., LIN, M. S. et HUANG, K. S. (2005). The surface EMG activity analysis between badminton smash and jump smash. *International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 483–486. [20](#)
- TSAI, C. L., YANG, C. C., LIN, M. S., HUANG, K. S. et CHANG, S. S. (2006). The surface EMG activity of the upper limb muscles of badminton forehand and backhand smashes. *24 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 3–6. [20](#)
- van den TILLAAR, R. et ETTEMA, G. (2006). A comparison between novices and experts of the velocity-accuracy trade-off in overarm throwing. *Perceptual and Motor Skills*, 103:503–514. [19](#)
- van den TILLAAR, R., ZONDAG, A. et CABRI, J. (2013). Comparing performance and kinematics of throwing with a circular and whip-like wind up by experienced handball players. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 23(6):e373–380. [20](#)
- WADDELL, D. B. et GOWITZKE, B. A. (2000). Biomechanical principles applied to badminton power stroke. *In 18 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 1–6. [19](#)
- WAGNER, H., PFUSTERSCHMIED, J., TILP, M., LANDLINGER, J., von DUVILLARD, S. P. et MÜLLER, E. (2014). Upper-body kinematics in team-handball throw, tennis serve, and volleyball spike. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 24(2):345–354. [19](#), [20](#)
- WEI, X. (2000). Application of filming and motion analysis in movement studies. *In 18 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 1–7. [16](#)

WHITE, H. (1980). A heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity. *Econometrica*, 48(4):817–838. [25](#)

YONEX (2013). Nanoray Z speed. [14](#)





# Chapitre 2

## Le “Multidirectional Repeated Sprint Ability for Badminton” : un test fiable et discriminant de l’expertise ?

■ *La force physique n’a de valeur que celle qu’elle emprunte de l’intelligence qui la dirige* ■

---

Félicité Robert de Lamennais

### Sommaire

---

<b>2.1 Anthropométrie et badminton</b> . . . . .	<b>47</b>
2.1.1 Caractéristiques anthropométriques générales des joueurs de badminton . . . . .	48
2.1.2 Comparaison anthropométrique entre les joueurs mondiaux . . . . .	51
2.1.3 La masse corporelle est-elle faible, moyenne ou forte? . . . . .	52
2.1.4 Les différentes approches méthodologiques de l’anthropométrie . . . . .	53
2.1.5 Le somatotype en badminton . . . . .	54
<b>2.2 Les tests physiologiques en badminton</b> . . . . .	<b>59</b>
2.2.1 Les tests physiques généraux et leur déroulement . . . . .	59
2.2.2 Les tests physiques spécifiques . . . . .	59

<b>2.3</b>	<b>Le “Multidirectionnal Repeated Sprint Ability for Bad- minton” : un nouveau test spécifique pour discriminer l’expertise ?</b>	<b>60</b>
2.3.1	Objectif	60
2.3.2	Protocole expérimental	61
2.3.3	Résultats	66
2.3.4	Discussion	75
<b>2.4</b>	<b>Références</b>	<b>85</b>

---

*Ce travail a été réalisé avec la collaboration de Céline Triolet et de Quentin Berger*





## 2.1 Anthropométrie et badminton

Chaque personne, chaque athlète, chaque joueur est constitué d’un patrimoine génétique qui lui est propre. L’ensemble de ces informations de base qui construit chaque personne peut permettre à certains de faire valoir des compétences uniques et personnelles. [Werkiani et al. \[2012\]](#) soulignent que les talents dits “naturels” sont des facteurs permettant d’accroître la performance sportive d’un athlète.

Chaque activité sportive met en avant, dans tous types de compétitions, des compétences techniques, des capacités physiques hors normes et des facteurs anthropométriques propres à chaque sport. La combinaison de l’ensemble de ces éléments permet une optimisation de la performance et peut être des facteurs de performance [[Ismail et al., 1993](#); [Lei et al., 1993](#); [Reilly, 1990](#)].

De nombreuses études ont montré une corrélation entre les mesures anthropométriques avec la structure corporelle des athlètes, leur masse osseuse [[Nordström et al., 2008](#); [Tervo et al., 2010](#)], leurs caractéristiques physiques et leurs habiletés sportives [[Claessens et al., 2000](#); [Gualdi-Russu et al., 1992](#); [Krakowiak et al., 2008](#); [Leone et al., 2002](#); [Sovak et Hawes, 1987](#); [Subramanian, 2013](#)]. Les caractères physiques et anthropométriques [[Carter et Heath, 1990a](#)] permettent une évaluation objective de la performance sportive des athlètes [[Sundarajan et al., 1982](#)]. De plus, la constitution corporelle est semblable parmi les joueurs pratiquant la même activité et la même discipline (simple ou double en badminton). L’activité sportive transforme le corps comme nous le montre les études comparant les mesures morphologiques, la composition musculaire, les composantes physiques et moteurs et les caractéristiques physiologiques [[Begon et Lacouture, 2005](#); [Lee et al., 2000](#)] des sportifs et ceux de la population générale [[Nikbakht, 2011](#); [Poliszczuk et Mosakowska, 2010](#); [Sokolowska et al., 2005](#)].

De nos jours, les études scientifiques regroupent les analyses anthropométriques et les valeurs physiologiques afin de mieux profiler un joueur de badminton. [Lee et al. \[2000\]](#) et [Begon et Lacouture \[2005\]](#) mettent en avant l’importance des mesures morphologiques, ainsi que les composantes corporelles, motrices et physiologiques pour accroître la performance.

Les mesures anthropométriques permettent de catégoriser les joueurs et d’observer leur évolution selon l’âge et/ou le niveau d’expertise dans l’activité. De plus, comme souligné précédemment, les différences entre les joueurs pratiquant la même activité et la même discipline n’influent en rien sur les facteurs de performance. De ce fait, plusieurs études regroupent des joueurs de disciplines différentes afin de faire émerger un “profilage anthropométrique” [Álvarez *et al.*, 2012; Amri *et al.*, 2012; Amusa *et al.*, 2001; Campos *et al.*, 2009; Mathur *et al.*, 1985; Poliszczuk et Mosakowska, 2010; Rahmawati *et al.*, 2007; Revan *et al.*, 2007; Wan Nudri *et al.*, 1996]. Cependant, chaque discipline nécessite des ressources physiologiques et morphologiques différentes. Des caractéristiques spécifiques peuvent tout au moins être soulignées [Phomsoupha et Lafaye, 2015].

### 2.1.1 Caractéristiques anthropométriques générales des joueurs de badminton

Si l’on prend en compte la taille comme une variable anthropométrique, elle apparaît comme un facteur de performance lié au niveau d’expertise. En effet, Poliszczuk et Mosakowska [2010] montrent au cours d’une étude que les 13 meilleurs joueurs mondiaux, en lien avec le classement de 2008 sont généralement plus grands (+5 cm) que les joueurs d’un niveau moins élevé. Néanmoins, il ne faut pas généraliser à l’ensemble de la population mondiale. Cela suggère l’idée que la taille peut être un critère qui augmente le pourcentages de situation où le joueur se retrouve en attaque ainsi ses possibilités d’attaque.

Cependant, la littérature révèle de légères différences des caractéristiques anthropométriques selon les pays d’origine. Les internationaux nigériens [Mathur *et al.*, 1985], malaisiens [Amri *et al.*, 2012; Ismail *et al.*, 1993; Ooi et Sidek, 2010; Ooi *et al.*, 2009; Wan Nudri *et al.*, 1996], indonésien [Rahmawati *et al.*, 2007], turques [Revan *et al.*, 2007] et espagnols [Abián-Vicén *et al.*, 2012] sont plus petits (en moyenne  $\approx 171$  cm) en comparaison au 13 meilleurs joueurs mondiaux. A l’inverse, les danois [Mikkelsen, 1979], les tchèques [Heller, 2010; Poliszczuk et Mosakowska, 2010], les sud-africains [van Lieshout et Lombard, 2003; Withers *et al.*, 1987] et les allemands [Bartunkova *et al.*,

1979; Raschka et Schmidt, 2013] sont les joueurs les plus grands (en moyenne  $\approx 182$  cm).

La taille des joueurs influencent leur habileté à générer des trajectoires descendantes sur l’ensemble du terrain. En considérant un joueur de badminton avec une taille (1.83 m), avec une hauteur de saut vertical (0.7 m) et une raquette (0.65 m), il est possible d’estimer les zones où le joueur est capable de créer une trajectoire descendante (figure 2.1).

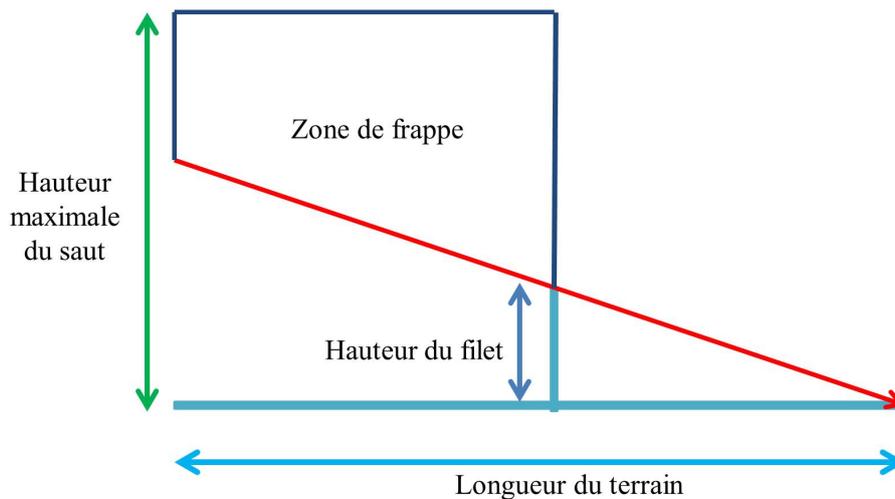


FIGURE 2.1 – Exemple d’un terrain vu de côté et zone d’impact pour générer une trajectoire descendante

En ce qui concerne la masse, plusieurs études montrent des différences selon les nationalités. En continuant de prendre comme point de référence l’étude de Poliszczuk et Mosakowska [2010], les 13 meilleurs joueurs mondiaux ont une masse moyenne de  $\approx 70$  kg pour  $\approx 179$  cm. En général les joueurs internationaux pèsent dans les  $\approx 67$  kg pour  $\approx 174$  cm. Toutefois, Lee *et al.* [2000] montrent une différence pondérale entre les asiatiques, les africains d’Amérique, les caucasiens et les hispaniques.

En comparant les différents joueurs internationaux par continent, nous obtenons pour les caucasiens des valeurs plus importantes (en moyenne  $\approx 74$  kg pour  $\approx 180$  cm) [Abian-Vicen *et al.*, 2013; Abian-vicen *et al.*, 2013; Bartunkova *et al.*, 1979; Heller, 2010; Mikkelsen, 1979; Poliszczuk et Mosakowska, 2010]. Pour la population africaine [Mathur *et al.*, 1985; van Lieshout et Lombard, 2003; Withers *et al.*, 1987], nous obtenons des valeurs intermédiaires (en moyenne  $\approx 70$  kg pour  $\approx 176$  cm) proche des valeurs de Poliszczuk et Mosakowska [2010]. Pour la population asiatique [Amri *et al.*,

2012; Ismail *et al.*, 1993; Ooi *et al.*, 2009; Rahmawati *et al.*, 2007; Revan *et al.*, 2007; Wan Nudri *et al.*, 1996], les valeurs sont les plus faibles (en moyenne  $\approx 60$  kg pour  $\approx 167$  cm) (tableau 2.2).

La masse joue un rôle dans le développement d’énergie dépensé par le joueur. En considérant deux joueurs de niveau équivalent avec une consommation maximale d’oxygène identique mais avec une constitution différente (60 kg pour 1.70 m (joueur A) et 85 kg pour 1.90 (joueur B)), la dépense énergétique entre les deux joueurs ne sera pas identique. De plus, le joueur A avec une taille plus importante aura des possibilités à générer des trajectoires descendantes plus fréquemment, cependant, sa dépense énergétique sera alors plus importante dû à sa masse. À l’inverse, le joueur B aura “moins” de zone de générateur de trajectoires descendantes, mais, sa dépense sera largement moins importante afin de durer dans le match. Ainsi, les stratégies des joueurs s’orientent selon leur constitution corporelle.

Le pourcentage de masse grasse a été étudié dans diverses études indépendantes du lieu. Cependant, l’utilisation de diverses méthodes de mesures comme la pince d’Harpenden skinfold [Nishizawa *et al.*, 2007; Tanner et Whitehouse, 1955] et l’analyseur de la composition corporelle ne permettent pas de toujours homogénéiser l’ensemble des résultats des études.

L’ensemble des études révèle en moyenne environ  $\approx 11.34$  % de masse grasse [Abian-Vicen *et al.*, 2013; Álvarez *et al.*, 2012; Amri *et al.*, 2012; Bartunkova *et al.*, 1979; Campos *et al.*, 2009; Carter et Heath, 1990a; Heller, 2010; Hussain, 2013; Ismail *et al.*, 1993; José Berral de la Rosa *et al.*, 2010; Majumdar *et al.*, 1997; Mathur *et al.*, 1985; Mikkelsen, 1979; Ooi *et al.*, 2009; Poliszczuk et Mosakowska, 2010; Rahmawati *et al.*, 2007; Raschka et Schmidt, 2013; Revan *et al.*, 2007; Singh et Singh, 2011; van Lieshout et Lombard, 2003; Wan Nudri *et al.*, 1996; Withers *et al.*, 1987]. En nous concentrant essentiellement sur le niveau d’expertise, nous obtenons  $\approx 12.85$  % pour les élites masculins,  $\approx 10.15$  % pour les experts masculines,  $\approx 9.84$  % pour les juniors masculins,  $\approx 18.41$  % pour les élites féminines et  $\approx 14.11$  % pour les juniors féminines. Les joueurs de badminton sont avant tout assez maigres (en moyenne  $\approx 11-12$  %) [Heller, 2010].

## 2.1.2 Comparaison anthropométrique entre les joueurs mondiaux

Comme nous le montre 10 des 24 études présentes, dans lesquelles les joueurs ont des pourcentages de masse grasse inférieur à 12 %, cela leur permet de tirer avantage au regard de l’augmentation de l’intensité du jeu. Les malaisiens [Rahmawati *et al.*, 2007] (14.6 (1.7) %) et les turques [Revan *et al.*, 2007] (22.8 (3.8) %) ont les pourcentages les plus élevés par rapport à la moyenne. A l’inverse, les nigériens [Mathur *et al.*, 1985] (8.2 (1.7) %), les tchèques [Heller, 2010] (8.3 (2.6) %) et les espagnols [Abian-vicen *et al.*, 2013] (8.4 (1.4) %) ont les pourcentages les plus faibles.

### 2.1.2.1 Les grands champions ou les petits grands champions ?

L’un des premiers facteurs anthropométriques qui frappe les observateurs et les spectateurs est la taille. L’importance d’être grand dans une activité peut être primordial comme au volley ball ou au basket. Cependant, que pouvons-nous dire de la taille des joueurs de badminton, et surtout des meilleurs ?

Poliszczuk et Mosakowska [2010] ont analysé les caractéristiques anthropométriques des 13 meilleurs joueurs mondiaux (selon le classement de 2008). Dans leur étude, ils mettent en avant que la taille moyenne des meilleurs joueurs est proche de  $\approx 179$  cm, ce qui est généralement plus grand que celle des joueurs d’un niveau inférieur (+5 cm). Cohen *et al.* [2015] montrent que la hauteur où est frappée le volant permet d’augmenter le pourcentage de situation dans lesquelles, les joueurs obtiennent des trajectoires descendantes. (figure 2.1).

De ce fait, la taille semble permettre aux joueurs d’obtenir des situations favorables avec des trajectoires descendantes mais n’est en rien un facteur dominant de la performance.

### 2.1.3 La masse corporelle est-elle faible, moyenne ou forte ?

En partant de l’étude de [Poliszczyk et Mosakowska \[2010\]](#), les 13 meilleurs joueurs mondiaux ont une masse moyenne de  $\approx 70$  kg. En comparant et en moyennant l’ensemble des joueurs internationaux de l’étude de [Lee et al. \[2000\]](#), des différences anthropométriques existent. Les européens et les américains ont les valeurs pondérales les plus élevées, tandis que la population africaine s’approche des valeurs des meilleurs mondiaux. Les asiatiques ont quant à eux les valeurs les plus faibles (tableau 2.2).

Pour obtenir le pourcentage de masse grasse, les études utilisent deux méthodes principalement. La première est l’utilisation de la pince à graisse (Harpender skinfold) [[Tanner et Whitehouse, 1955](#)] et la seconde est l’analyseur de la composition corporelle (balance à impédance) [[Nishizawa et al., 2007](#)]. Le tableau 2.2 compile l’ensemble des valeurs des études qui ont pu permettre le recueil de la masse grasse.

Celles-ci montrent une moyenne de  $\approx 11.34$  % de la masse grasse chez les joueurs de badminton (tableau 2.2). Dans son étude en 1997, [Majumdar et al. \[1997\]](#) trouvent des valeurs moyennes de  $\approx 12.1$  (3.4) %. Dans une étude plus récente, [Phomsoupha et Laffaye \[2015\]](#) retrouvent des valeurs très proches comprises entre 11 - 12 %. Ce faible pourcentage est un avantage pour se déplacer sur le terrain sans dépenser trop d’énergie au regard de l’intensité de jeu.

[Majumdar et al. \[1997\]](#) et [Mikkelsen \[1979\]](#) ont relevé des indices de masses corporelles de 18.9 (2.1) et 23.6 (2.0), révélant d’une masse normale des joueurs de badminton. Cependant, l’évolution du jeu a aussi fait évoluer les joueurs. On peut observer une augmentation de  $\approx 5$  cm et de  $\approx 5$  kg de 1997 [[Majumdar et al., 1997](#)] à 2008 [[Poliszczyk et Mosakowska, 2010](#)]. Cependant, il faut regarder ses résultats avec certaines précautions. Les études utilisent avant tout des méthodes différentes, ce qui peut induire des différences importantes entre les deux résultats.

### 2.1.4 Les différentes approches méthodologiques de l’anthropométrie

Le somatotype est une méthode qui est basée sur le travail de William Sheldon dans les années 1940. Il permet de démontrer les similitudes ou les différences entre plusieurs groupes d’individus, incluant aussi les athlètes d’une même activité physique. Le somatotype est un indicateur de la construction d’une personne basée sur l’indice de Sheldon [Sheldon *et al.*, 1940] (voir figure 2.2). Il est découpé en trois pôles :

- l’ectomorphe qui possède une silhouette svelte et élancée ;
- le mésomorphe qui est avant tout musclé et athlétique ;
- l’endomorphe qui a tendance à stocker aisément de la graisse.

La plus haute valeur sert comme un indicateur de la silhouette générale du sujet [van Lieshout et Lombard, 2003].

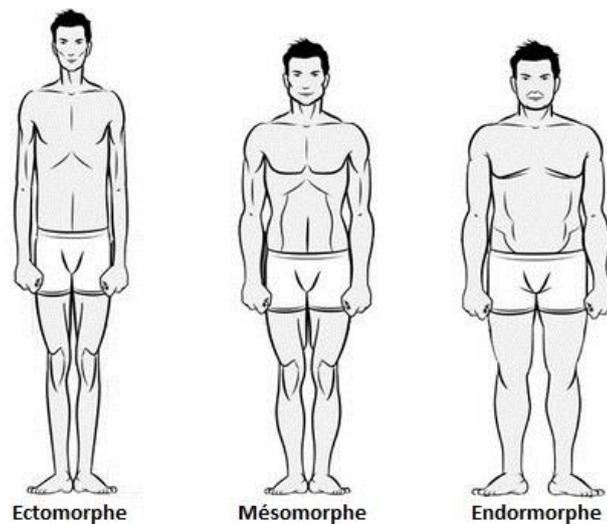


FIGURE 2.2 – Exemples des différents types de somatotypes

Utilisé comme un outil scientifique dans le recueil des mesures anthropométriques, le somatotype est construit en utilisant des valeurs numériques pour chaque composante. La méthode du somatotype de Heath-Carter [Carter, 1980; Heath et Carter, 1967] est la plus souvent utilisée dans les études pour identifier les catégories des athlètes [Carter et Heath, 1990a] qui sont l’endomorphie, le mésomorphie et l’ectomorphie [Abián-Vicén *et al.*, 2012; Álvarez *et al.*, 2012; Carter et Heath, 1990a; Hussain, 2013; Mathur *et al.*, 1985; Poliszczuk et Mosakowska, 2010; Rahmawati *et al.*, 2007; Raschka et Schmidt, 2013; Revan *et al.*, 2007; Singh et Singh, 2011]. Elles sont construites en une échelle de

sept degrés allant de 1 (très faible) à 7 (très fort). L’expression finale d’un somatotype est composée de trois chiffres, où le premier chiffre représente le degré d’endormorphie, le chiffre du milieu indique le degré de mésomorphie et le dernier représente le degré d’ectomorphie.

Les paramètres mesurés dans l’appréciation du somatotype sont la taille, la masse du sujet, la largeurs bi-condyliennes de l’humérus et du fémur, la circonférence du mollet et des membres supérieurs, le sous-scapulaire, le mollet et les plis cutanés supraspinaux [Carter et Heath, 1990a]. Les composantes du somatotypes des individus sont calculées selon la méthode de Heath-Carter en utilisant les équations suivantes [Carter, 2002; Carter et Heath, 1990a] :

$$\mathbf{Endomorphie} = -0.7182 + 0.1415(X) - 0.00068(X^2) + 0.0000014(X^3) \quad (2.1)$$

avec [X = plis cutanés du triceps + plis cutanés du sous-scapulaire + plis cutanés du supraspinal]

$$\mathbf{Mésomorphie} = 0.858H + 0.601 \times F + 0.188 \times B + 0.161 \times M - T0.131 + 4.5 \quad (2.2)$$

avec [H = largeur humérus ; F = largeur fémur ; B = circonférence bras ; M = circonférence mollet et T = taille]

En ce qui concerne l’ectomorphie, il existe trois différentes équations pour le calculer selon le ratio taille-masse (RTP) :

- RTP est plus grand ou équivalent à 40.75 : **Ectomorphie** = 0.732 RTP – 28.58 ;
- RTP est inférieur à 40.75 : **Ectomorphie** = 0.463 RTP – 17.63 ;
- RTP est équivalent ou inférieur à 38.25 : **Ectomorphie** = 0.1.

### 2.1.5 Le somatotype en badminton

Le somatotype peut permettre de démontrer des similitudes et des différences entre plusieurs groupes d’individus dans la même activité sportives. Les joueurs de bad-

minton semblent avoir un profil homogène comprenant l’ensemble des somatotypes (tableau 2.3), avec une valeur moyenne de 2.8 (endomorphe), 3.6 (mesomorphe) et 3.1 (ectomorphe).

Plus spécifiquement, plusieurs études (tableau 2.2) ont trouvé des profils ectomorphes chez les joueurs australiens (2.5 - 4.6 - 3.2) [Carter et Heath, 1990b], espagnols (2.3 - 3.7 - 2.8 et 2.5 - 4.1 - 3.6) [Abián *et al.*, 2012; Álvarez *et al.*, 2012] et nigériens (2.2 - 3.9 - 2.9) [Mathur *et al.*, 1985]. Une seule étude a trouvé un profil endo/mésomorphe chez des joueurs indiens (3.0-4.1-2.5) [Hussain, 2013] et un profil endo/ectomorphe chez des joueurs turques (3.5 - 2.1 - 2.8) [Revan *et al.*, 2007]. Les joueurs tchèques (3.0 - 3.0 - 2.5) [Poliszczuk et Mosakowska, 2010], allemands (2.3 - 3.2 - 2.7) [Raschka et Schmidt, 2013], indonésiens (3.3 - 3.7 - 3.7) [Rahmawati *et al.*, 2007] et indiens (2.7 - 3.2 - 3.3) [Singh et Singh, 2011] ont un profil homogène. Cependant, l’ensemble des valeurs se localise vers le centre du somatocharte (voir figure 2.3). Cela suggère que les joueurs grands en taille, sveltes et musclés sont adaptés aux caractéristiques du match [Phomsoupha et Laffaye, 2015]. Les valeurs élevées de la composante mésomorphe et ectomorphe et la faible valeur de la composante endomorphe tendent vers cette suggestion [Singh et Singh, 2011].

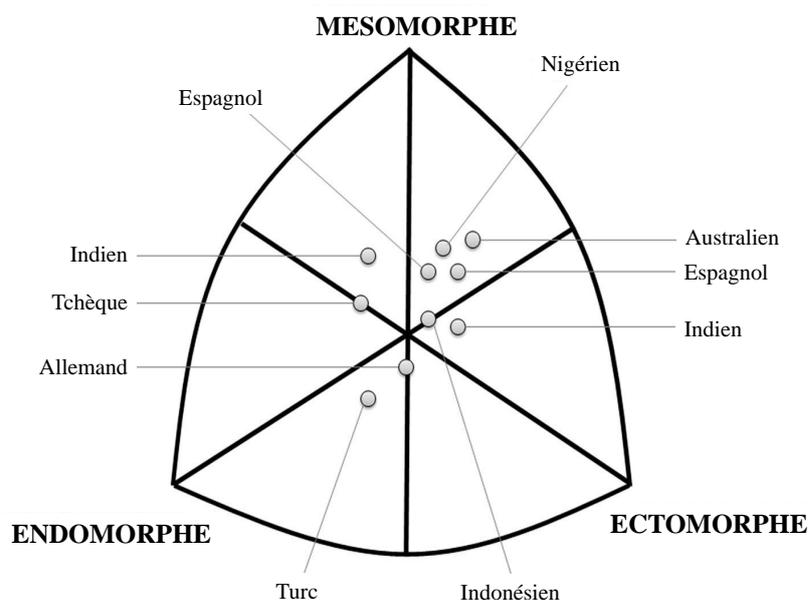


FIGURE 2.3 – Somatotype moyen des hommes représenté par le Heath-Carter somatocharte en badminton

Toutes ces études tendent à montrer que les joueurs de badminton sont généralement grands et sveltes, avec une tendance vers les variables ecto-mesomorphes adaptées aux grandes demandes physiologiques d’un match. Durant un match, afin d’être le plus performant, l’utilisation musculaire pour générer des frappes et des déplacements orientent les joueurs vers un profil mésomorphe. L’influence de la masse des joueurs amène les joueurs à avoir un profil ectomorphe. Ainsi, le profil ecto-mésomorphe est le profil pré-dominant chez les joueurs de badminton.

Étude	Sujet (n)	Taille (cm)	Masse (kg)	% Fat	IMC
Masculin					
Mathur <i>et al.</i> [1985]	Elite (131)	172.4 (5.3)	67.9 (3.6)	8.2 (1.7)	NS
Amri <i>et al.</i> [2012]	Elite (138)	174.2 (3.7)	68.9 (3.4)	14.6 (1.7)	22.7 (0.9)
Wan Nudri <i>et al.</i> [1996]	Elite (84)	167.0 (0.1)	61.3 (4.9)	14.6 (2.9)	22.0 (1.8)
Poliszczuk et Mosakowska [2010]	Elite (9)	184.6 (6.01)	80.7 (9.05)	9.6 (3.3)	23.6 (1.9)
Rahmawati <i>et al.</i> [2007]	Elite (19)	160.4 (6.8)	48.7 (7.4)		18.9 (2.1)
Revan <i>et al.</i> [2007]	Elite (50)	166.4 (5.6)	59.5 (7.7)	22.8 (3.8)	21.5 (2.7)
Abián-Vicén <i>et al.</i> [2012]	Elite (46)	177.9 (6.0)	71.6 (5.7)	8.3 (1.4)	
Raschka <i>et al.</i> [2013]	Expert (40)	182.0 (4.6)	77.5 (5.9)	10.8 (1.9)	23.4 (1.6)
Álvarez <i>et al.</i> [2012]	Junior (19)	170.8 (11.2)	61.1 (16.7)	12.0 (2.8)	20.6 (3.4)
Hussain [2013]	Junior (30)	165.5 (5.3)	63.5 (4.9)	11.4 (1.3)	NS
Féminin					
Revan <i>et al.</i> [2007]	Elite (50)	164.2 (7.3)	60.1 (7.3)	23.7 (3.9)	22.3 (2.2)
Abián-Vicén <i>et al.</i> [2012]	Elite (46)	165.4 (5.6)	61.1 (3.9)	16.9 (2.4)	
Álvarez <i>et al.</i> [2012]	Junior (19)	165.4 (3.6)	59.3 (5.2)	59.3 (5.2)	15.5 (3.1)

TABLEAU 2.1 – Synthèse des études portant sur les caractéristiques anthropométriques générales des joueurs de badminton

Etude	Taille (cm)	Masse corporelle (kg)	IMC
Masculin			
Mathur <i>et al.</i> [1985]	172.4 (5.3)	67.9 (3.6)	NS
Poliszczuk et Mosakowska [2010]	184.6 (6.0)	80.7 (9.0)	23.6 (1.9)
Rahmawati <i>et al.</i> [2007]	160.4 (6.8)	48.7 (7.4)	18.9 (2.0)
Revan <i>et al.</i> [2007]	166.4 (5.6)	59.5 (7.7)	21.5 (2.7)
Abián <i>et al.</i> [2012]	177.9 (6.0)	71.6 (5.7)	NS
Raschka et Schmidt [2013]	182.0 (4.6)	77.5 (5.9)	23.4 (1.6)
Álvarez <i>et al.</i> [2012]	170.8 (11.2)	61.1 (16.6)	20.6 (3.4)
Hussain [2013]	165.5 (5.3)	63.5 (4.9)	NS
Féminin			
Revan <i>et al.</i> [2007]	164.2 (7.3)	60.1 (7.3)	22.3 (2.2)
Abián <i>et al.</i> [2012]	165.4 (5.6)	61.1 (3.9)	NS
Álvarez <i>et al.</i> [2012]	165.4 (3.6)	59.3 (5.2)	21.6 (1.3)

TABLEAU 2.2 – Résumé des études faisant état des caractéristiques anthropométriques

Etude	Endomorphisme	Mésomorphisme	Ectomorphisme
Masculin			
Mathur <i>et al.</i> [1985]	2.2 (0.9)	3.9 (1.1)	2.9 (0.6)
Poliszczuk et Mosakowska [2010]	3.0 (NS)	3.0 (NS)	2.5 (NS)
Rahmawati <i>et al.</i> [2007]	3.3 (0.8)	3.7 (1.1)	3.7 (1.3)
Revan <i>et al.</i> [2007]	3.5 (1.0)	2.1 (1.2)	2.8 (0.9)
Abián <i>et al.</i> [2012]	2.3 (0.6)	3.7 (0.9)	2.8 (0.9)
Singh et Singh [2011]	2.7 (1.9)	3.2 (1.1)	3.3 (1.2)
Raschka et Schmidt [2013]	2.3 (0.6)	3.2 (0.9)	2.7 (0.8)
Carter et Heath [1990a]	2.5 (NS)	4.6 (NS)	3.2 (NS)
Álvarez <i>et al.</i> [2012]	2.5 (0.5)	4.1 (0.9)	3.6 (1.2)
Hussain [2013]	3.0 (0.5)	4.1 (0.8)	2.5 (0.6)
Féminin			
Revan <i>et al.</i> [2007]	3.7 (1.0)	3.1 (1.2)	2.3 (1.1)
Abián <i>et al.</i> [2012]	3.4 (0.5)	3.7 (0.9)	2.2 (0.7)
Álvarez <i>et al.</i> [2012]	4.2 (1.2)	2.6 (0.6)	2.6 (0.6)

TABLEAU 2.3 – Résumé des études faisant état des somatotypes de 1 à 7

## 2.2 Les tests physiologiques en badminton

Les tests physiques sont des excellents outils pour évaluer un niveau de forme et planifier des séances dans le but d’une progression. Ils permettent de connaître le niveau de départ, l’évolution et ainsi de mettre en place un programme d’entraînement afin d’augmenter la performance des joueurs. Il existe plusieurs types de tests :

- les tests cardio-vasculaires : permettant une évaluation de la condition physique ;
- les tests de force : évaluant le niveau de force maximale, la puissance et l’exploisivité ;
- les tests de souplesse et d’équilibre : proposant une meilleure fonctionnalité du corps ;
- les tests de résistance : permettant de connaître la limite des capacités.

### 2.2.1 Les tests physiques généraux et leur déroulement

Les expérimentations en laboratoire, les essais méthodologiques sur le terrain et les procédures diffèrent entre les chercheurs travaillant dans la recherche de compréhension physique du badminton. Les tests physiques et plus particulièrement les tests cardio-vasculaires permettant l’identification de la consommation maximale d’oxygène ( $VO_{2max}$ ) sont souvent réalisés soit à l’aide d’un tapis roulant [Bottoms *et al.*, 2013; Faude *et al.*, 2007; Heller, 2010], soit durant un exercice progressif sur un vélo ergomètre stationnaire [Ghosh, 2008], soit des tests navettes [Leger et Lambert, 1982; Liddle *et al.*, 1996; Ooi *et al.*, 2009]. Les tests intermittents (Yo-Yo intermittent test) sont davantage pensés pour être une autre mesure valide du champ des sports intermittents durants [Bangsbo *et al.*, 2008].

### 2.2.2 Les tests physiques spécifiques

Plusieurs études scientifiques se sont intéressées à la validité et aux limites des différents tests spécifiques permettant de déterminer les capacités physiologiques et les performances des joueurs de badminton de haut-niveau [Baum *et al.*, 1998; Chin *et al.*, 1995; Hughes et Fullerton, 1995; Smith et Chang, 1999; Wonisch *et al.*, 2003]. Afin de reproduire au mieux et le plus fidèlement les conditions de match réelles, les tests physiques se déroulent sur un terrain de badminton. Le test classique se compose de

six lumières montées sur des poteaux, avec des lumières connectées à un dispositif de programmation informatisée [Steininger et Wodick, 1987]. Les lumières sont localisées par paires, situés au filet, au milieu du terrain et au fond du terrain [Bottoms *et al.*, 2013; Chin *et al.*, 1995; Fuchs *et al.*, 2014]. Il est demandé aux joueurs de répondre le plus rapidement possible en se déplaçant vers le coin du terrain où la lumière est dirigée. Lorsque les lumières du filet et du mi-court s’allument, les joueurs doivent réaliser une fente avant. Pour le fond du terrain, les joueurs doivent imiter un smash entre les lignes du couloir du fond de terrain. Le test commence avec 15 lumières par minute et augmente toutes les 3 minutes en rajoutant 3 lumières supplémentaires [Chin *et al.*, 1995; Fuchs *et al.*, 2014]. Un autre test d’agilité latérale (sideway agility test) amène les joueurs à modifier leurs appuis sur la largeur du terrain sur un total de 10 répétitions. Ils doivent frapper les volants situés sur la ligne latérale du couloir de simple afin de marquer leur passage.

Un test amenant des déplacements sur les quatre coins du terrain (four corner agility test) demande aux joueurs de réaliser 16 déplacements, avec des séquences de 4 déplacements pré-définis, et de frapper les volants situés à chaque coin [Ooi *et al.*, 2009]. Le lactate sanguin, l’absorption d’oxygène ( $VO_2$ ) et le rythme cardiaque sont enregistrés continuellement avant [Cabello *et al.*, 2004; Cabello Manrique et González-Badillo, 2003; Chen *et al.*, 2011], pendant [Cabello *et al.*, 2004; Cabello Manrique et González-Badillo, 2003; Chen *et al.*, 2011, 2013; Chin *et al.*, 1995] et après le test [Cabello *et al.*, 2004; Cabello Manrique et González-Badillo, 2003; Chen *et al.*, 2011; Chin *et al.*, 1995].

## **2.3 Le “Multidirectionnal Repeated Sprint Ability for Badminton” : un nouveau test spécifique pour discriminer l’expertise ?**

### **2.3.1 Objectif**

L’objectif de cette étude est de catégoriser des sportifs selon leur performance à partir d’un test anaérobie spécifique au badminton. Le test, “Multidirectional Repeated

Sprint Ability for Badminton” (MRSAB) permet de catégoriser le niveau du joueur de badminton, en fonction du niveau de performance et de la diminution de la performance.

## 2.3.2 Protocole expérimental

### 2.3.2.1 Participants

Pour réaliser cette expérimentation, nous avons fait appel à 50 joueurs (tableau 2.4). Les joueurs ont été catégorisés selon le système de classement français (FFBaD, 2016) : non classé (néophyte), promotion (débutant), départemental (intermédiaire), régional (avancé) et national (expert). Tous les athlètes étaient en bonne santé et n’ont signalé aucune blessure durant tout le temps de l’expérimentation.

Avant de venir participer à l’expérience, les participants se sont abstenus de boire de l’alcool ou des boissons à base de café les dernières 24 heures et ne se sont pas alimentés durant les dernières 2-3 heures avant l’expérimentation, afin de réduire au maximum tous les effets pouvant interférer dans l’expérimentation.

Variable	Non classé	Promotion	Départemental	Régional	National
Age (année)	18.5 (0.7)	18.9 (1.1)	22.3 (7.2)	25.3 (6.2)	20.4 (2.6)
Taille (cm)	165.3 (4.3)	182.1 (3.9)	176.4 (7.7)	178.8 (1.9)	183.4 (6.1)
Masse (kg)	56.7 (4.9)	70.1 (3.8)	69.8 (10.1)	78.4 (4.5)	74.1 (5.5)
% de masse grasse	23.5 (4.6)	11.6 (1.6)	15.6 (3.1)	15.5 (2.5)	14.1 (4.5)
% hydrique	58.9 (1.2)	68.8 (1.7)	63.5 (3.4)	63.8 (2.5)	65.1 (5.3)
% de muscle	38.1 (0.2)	46.8 (1.4)	42.4 (2.8)	43.3 (1.1)	43.3 (4.5)
Heure de pratique (heure par semaine)	0.0 (0.0)	2.1 (1.7)	5.3 (2.5)	6.3 (2.6)	11.3 (4.1)

TABLEAU 2.4 – Anthropométrie des joueurs

### 2.3.2.2 Variables physiologiques : le lactate et le rythme cardiaque

Après la phase de préparation, des échantillons sanguins ont été prélevés pour observer l’évolution du lactate sanguin du début du test à la fin de l’expérimentation. Le prélèvement s’est effectué pré- et post-test. Pour obtenir cette concentration, le sang a été prélevé sur un des doigts de la main non dominante (ne tenant pas la raquette), en utilisant un dispositif portable de prise de lactate (Arkay, Japon). De plus, les participants étaient équipés durant tout le match d’un cardiofréquencemètre afin d’enregistrer

continuellement le rythme cardiaque (RS400 ; Kempele, Finlande).

### 2.3.2.3 Variables neuromusculaires des membres inférieurs et supérieurs

Une phase de familiarisation des différents sauts et de la force de préhension a été réalisée et dirigée a. Trois types de sauts sont réalisés au cours de l’expérimentation, le squat jump (SJ), le contre mouvement jump (CMJ) et le saut rebond (LS). Les joueurs avaient comme instruction durant le SJ de se baisser à 90° de flexion de genou, de placer les mains sur les hanches et de sauter le plus haut possible. La réalisation du CMJ est très proche du SJ, sauf que pour celui-ci les joueurs ne pratiquent pas un temps d’arrêt à 90°. Pour le LS, les joueurs avaient comme instruction de sauter le plus haut possible avec un temps de contact le plus faible possible au sol.

Toutes les performances ont été enregistrées à l’aide d’un accéléromètre à une fréquence de 500 Hz (Myotest, SA, Suisse). Les différents sauts sont calculés à partir du temps d’envol comme le préconisent Choukou *et al.* [2014]. Le temps passé dans les airs permet de calculer le pic de puissance relatif (W/kg) pour le SJ et le CMJ [Harman *et al.*, 1991]. Pour calculer la raideur, nous avons utilisé comme le préconisent Dalleau *et al.* [2004], la formule suivante :

$$LS = \frac{M * \pi(T_f + T_c)}{T_c^2 \left( \frac{(T_f + T_c)}{\pi} - \frac{T_e}{4} \right)} \quad (2.3)$$

où  $M$  est la masse totale du sujet,  $T_c$  le temps de contact et  $T_f$  le temps d’envol.

En complément, nous avons procédé au recueil de la force maximale de la force de préhension de la main et des doigts en suivant les recommandations de l’American Society of Hand Therapists. Chaque participant était assis le dos droit, les pieds à plat au sol et les bras en adduction le long du corps. L’angle formé par le coude était de 90° et l’avant-bras était en position neutre. Les joueurs avaient comme instruction de serrer au plus fort le dynamomètre avec la main puis avec les doigts (Camry EH/101, Rosemead, US) et de tenir pendant 3 secondes (effort isométrique). Les participants devaient conserver leur posture sans modifier l’orientation du coude afin de ne pas compenser la fatigue musculaire. Seul le bras dominant a été enregistré et les meilleures performances sur un maximum de deux essais ont été gardées pour analyse.

#### 2.3.2.4 Variables psychologiques sur la perception de la fatigue

Au début et à la fin de l’expérimentation, les joueurs révélèrent leur propre évaluation de la perception de la fatigue “centrale” (cardio-vasculaires) et périphérique (membres inférieurs) selon l’échelle proposée par [Borg et al. \[1985\]](#). Cette échelle allant de 6 (très faible) à 20 (exténué) est un révélateur de la perception du joueur de son état de fatigue.

#### 2.3.2.5 Design de l’expérimentation

Avant le début de l’expérimentation, les composantes anthropométriques des participants ont été relevées à l’aide d’une balance à impédance permettant de recueillir la masse, le pourcentage de masse grasse, le pourcentage hydrique et le pourcentage de muscle. Ils ont réalisé par la suite, un échauffement réglementé, consistant à courir pendant 10 minutes avec des déplacements spécifiques et un échauffement terrain sous forme de “shadow”.

Après cette phase d’échauffement, les participants étaient familiarisés aux différents tests neuromusculaires et physiologiques de l’activité. La durée de l’expérimentation était d’environ 25 minutes par participant. Le protocole expérimental amenait les joueurs à réaliser une batterie de tests avant de réaliser un test spécifique au badminton (MRSAB) puis de recueillir à nouveau les variables de départ. La figure 2.4 récapitule le temps de prélèvement des différentes variables au cours de l’expérience.

#### 2.3.2.6 Le Multidirectional Repeated Sprint Ability for Badminton (MRSAB)

Le test reproduit les efforts et les déplacements lors d’un échange de badminton entrecoupé d’une phase de récupération proche de celle obtenue en match ( $\approx 30$  secondes). Le test s’effectue à l’aide d’un appareil, le FitLight (Fitligh Sports Corp., Ontario, Canada), utilisant des capteurs de mouvement et des leds. Au cours de cette expérimentation, cinq leds étaient utilisées et réparties sur les quatre coins et au centre du terrain. La led centrale est située au centre du terrain et est éloignée de chaque led périphérique de 4 mètres (figure 2.6).

	Pré - Test	MRSAB	Post – Test
Anthropométrie	X		X
Lactate	X		X
RPE	X		X
Neuromusculaire	X		X
Test (Fitlight)		X	
Rythme cardiaque		X	
Capture des appuis		X	

FIGURE 2.4 – Organisation temporelle des différents recueils de données

Le participant se déplace vers la led qui s’allume, effectuant des déplacements dans les 4 directions avec des changements de trajectoire de 90° en se replaçant vers le centre du terrain. Un ordre est pré-établi en amont et une séquence de familiarisation a lieu avant le début du test. Le joueur démarre du centre du terrain et se déplace vers les différentes leds. La figure 2.6 montre le positionnement des leds et l’ordre de passage. Ainsi, le participant effectue deux rotations, soit un total de 8 déplacements comprenant 10 séries entrecoupées de 30 secondes de récupération. Le fitlight est composé d’une tablette permettant de recueillir le temps total d’une série et le temps entre les différentes leds.

Pour quantifier l’habileté d’un joueur à la fatigue durant le test, nous avons utilisé l’index de fatigue (FI) et le pourcentage de perte ( $S_{dec}$ ). Le FI est généralement calculé selon la formule de Girard *et al.* [2011] :

$$FI = 100 * \frac{(S_{Meilleur} - S_{Mauvais})}{S_{Meilleur}} \quad (2.4)$$

où  $S$  représente le temps de performance d’un essai au cours du test. De plus pour se rendre compte de la perte liée au test ( $S_{dec}$ ), un score est attribué en utilisant la formule de Girard *et al.* [2011] :

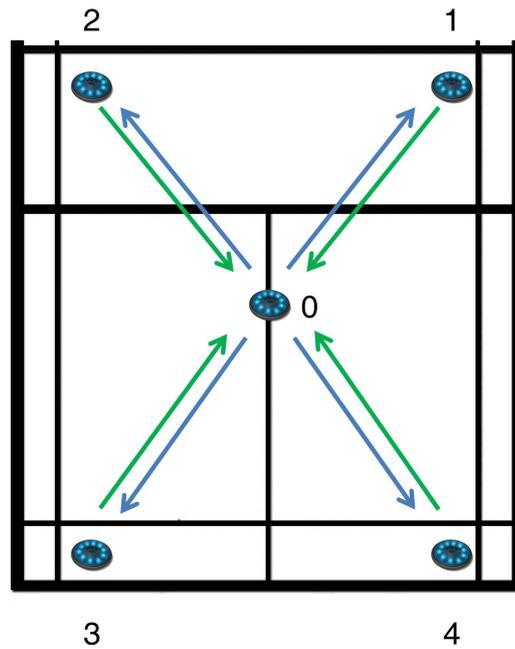


FIGURE 2.5 – Déplacements (en bleu) et replacements (en vert) selon l’ordre prédéfini (1 à 4)

$$\left\{ 1 - \frac{S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_{Final}}{S_{Meilleur} * n_{essais}} \right\} * 100 \quad (2.5)$$

De plus, le test est réalisé deux fois par chaque participant permettant de valider la reproductibilité du test.

### 2.3.2.7 Variable de déplacement

Les appuis des joueurs ont été enregistrés à l’aide d’une caméra vidéo (HDR-XR260VE, Sony, Minato, Japan). L’analyse s’effectuera à postériori afin d’observer les changements moteurs ou la stabilisation motrice durant l’ensemble du test. Un appui est défini comme étant le décollement du pied du sol puis le retour en contact du sol.

### 2.3.2.8 Variables de la vitesse du volant

L’expérimentation se déroulait avec un joueur expérimenté servant au milieu du terrain afin que le participant puisse simuler un smash. Durant notre consigne, nous avons demandé aux joueurs de ne pas effectuer un smash en extension afin que les joueurs non initiés puissent avoir la même condition de frappe. De plus la présence du saut

augmente la performance. Les joueurs avaient une cible à viser, un tapis de 2 mètres sur 2 mètres situé sur le terrain adverse [Chelly et Denis, 2001]. Les expérimentateurs étaient situés à l’arrière du terrain à 3 mètres du joueur, muni d’un radar Doppler qui est un dispositif de recueil des vitesses (Stalker Sport system, Texas, US) ayant une fréquence d’acquisition de 250 Hz et une précision de 0.027 m/s. La figure 2.6 explique le dispositif mis en place. Durant le chapitre précédent, nous avons validé le radar et l’accéléromètre. Nous avons choisi d’utiliser le radar puisqu’il permettait d’obtenir des vitesses supérieures à 325 km/h et nous avons dans notre échantillon d’experts, des joueurs pouvant atteindre voir franchir ce palier.

Les joueurs avaient pour consigne de smasher le plus fort possible sur la cible. Seuls les smashes touchant la cible ont été enregistrés pour traitement. De plus la vitesse maximum était recueillie pour l’analyse statistique.

### 2.3.2.9 Analyse statistique

Pour analyser l’ensemble des résultats, la conception statistique nous a amené à réaliser une analyse de la variance à mesure répétée (ANOVA) sur les différents analyseurs enregistrés tout le long de l’expérience. Dans le cas où la variance était significative, nous procédions à un test Post Hoc de Fischer’s. Le seuil d’acceptabilité était de  $p < 0.05$  et la taille de l’effet ( $\eta^2$ ) défini comme petit pour  $\eta^2 > 0.01$ , moyen pour  $\eta^2 > 0.09$ , ou grand pour  $\eta^2 > 0.25$ . Le coefficient de corrélation Spearman a été calculé pour déterminer les relations entre les différentes variables sélectionnées (Statistica 10 software, StatSoft Inc., Tulsa, US). De plus, un T de Student est réalisé afin d’observer la variation du nombre d’appuis au cours du test.

### 2.3.3 Résultats

Les résultats de notre étude seront structurés de la manière suivante. Ils mettront en avant les variables physiologiques, les variables neuromusculaires, les variables psychologiques et l’analyse du test. Les variables neuromusculaires ont été normalisées à la masse du corps afin d’avoir la meilleure représentation possible selon l’hétérogénéité.

### 2.3.3.1 Reproductibilité du test

Le test est reproductible quelque soit le niveau d’expertise ( $p > 0.05$ ). La figure 2.6 montre la corrélation entre les deux passages selon les joueurs ( $p < 0.001$ ).

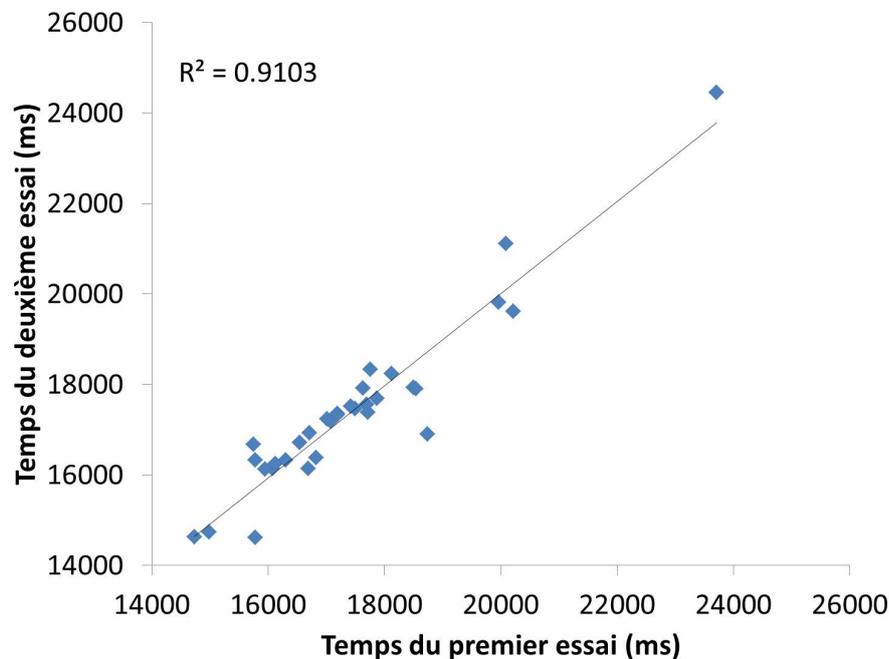


FIGURE 2.6 – Corrélation entre le premier essai et le second essai

### 2.3.3.2 Variables physiologiques

Le taux de lactate sanguin durant le test augmente significativement pré- et post-test ( $p < 0.001$ ). La figure 2.7 montre l’évolution de la lactatémie selon les différents niveaux.

L’évolution du rythme cardiaque au cours mesuré du test est en moyenne de  $\approx 181.4$  (4.2) battements/min, correspondant à  $\approx 90$  % de la fréquence maximale ( $\%HR_{max}$ ) des participants. Cette dernière a été calculée de manière théorique en soustrayant l’âge de l’athlète moins 220. Le tableau 2.5 résume la  $HR_{max}$  obtenue selon les différents niveaux ( $p > 0.05$ ).

### 2.3.3.3 Variables neuromusculaires

Au cours des deux enregistrements, la hauteur des différents sauts SJ (figure 2.8a), CMJ (figure 2.8b) et LS (figure 2.8c) tend à diminuer au cours du test (figure 2.8). De

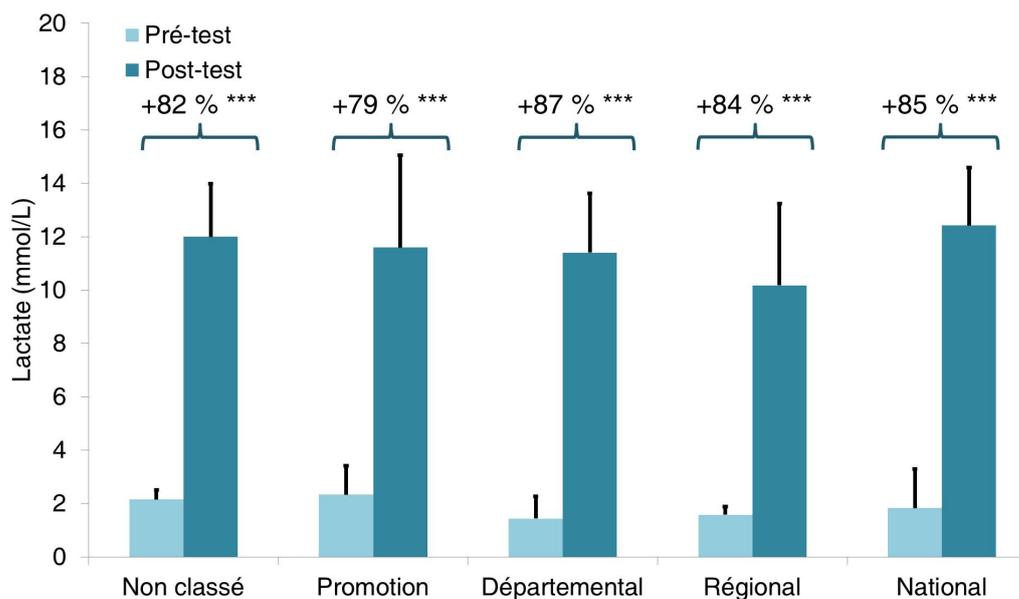


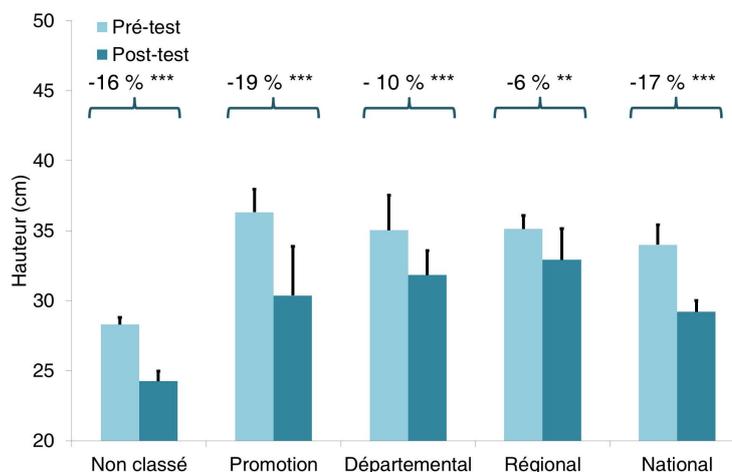
FIGURE 2.7 – Évolution du lactate pré- et post-test, avec \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$  et \*\*\*  $p < 0.001$

Classement	Non classé	Promotion	Départemental	Régional	National
Fréquence cardiaque	182.2 (3.1)	184.7 (5.5)	181.6 (4.8)	179.2 (7.8)	181.3 (9.5)
Fréquence cardiaque maximale (%)	≈ 90.5	≈ 92	≈ 92	≈ 92	≈ 91

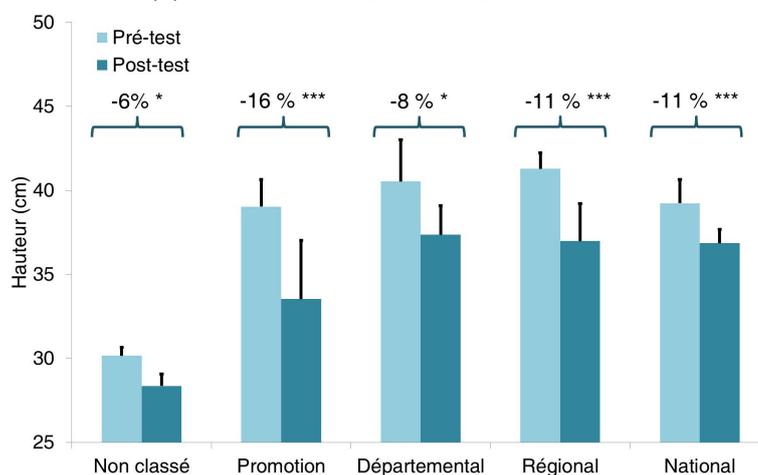
TABLEAU 2.5 – Fréquence cardiaque moyenne et le % de la fréquence cardiaque maximale durant le test

plus, la hauteur du SJ et du LS est significativement inférieure à celle du CMJ ( $p < 0.001$ ) (34.5 cm et 33.3 cm contre 39.6 cm, respectivement). De plus le pic de puissance lors du SJ diminue significativement ( $p < 0.001$ ), passant de 45.7 W/kg à 42.0 W/kg (soit une perte de -8.6 %) et de 40.5 W/kg à 39 W/kg lors du CMJ (soit une perte de -4.1 %) lié au test. On relève une corrélation significative lors de la diminution de la puissance durant le SJ et le CMJ ( $R = 0.89$ ;  $p < 0.001$ ).

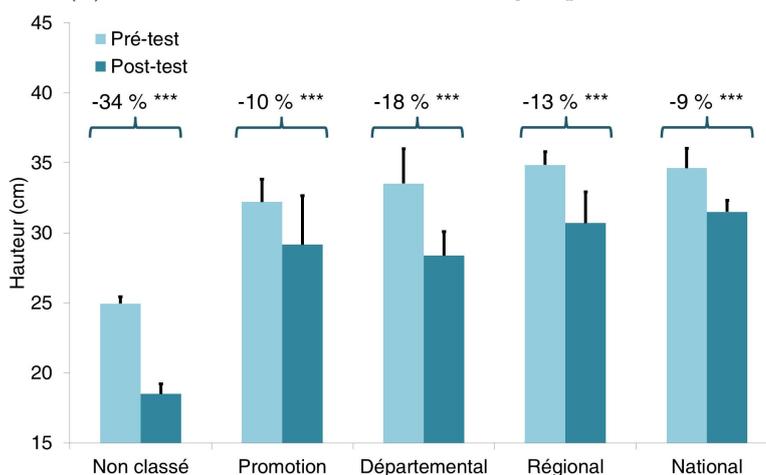
La force de préhension de la main (figure 2.9a) et des doigts (figure 2.9b) diminue significativement durant le match ( $p < 0.001$ ) (figure 2.9), avec une perte de force respectivement de -13.9 % et -8.7 % (tableau 2.6). De plus, on observe à travers les résultats une forte corrélation entre la force des fléchisseurs de la main et des doigts ( $R < 0.93$ ;  $p < 0.001$ ). Le tableau 2.6 résume l’ensemble des variables pré- et post-test de tous les joueurs quelque soit le niveau d’expertise.



(a) Hauteur du squat jump

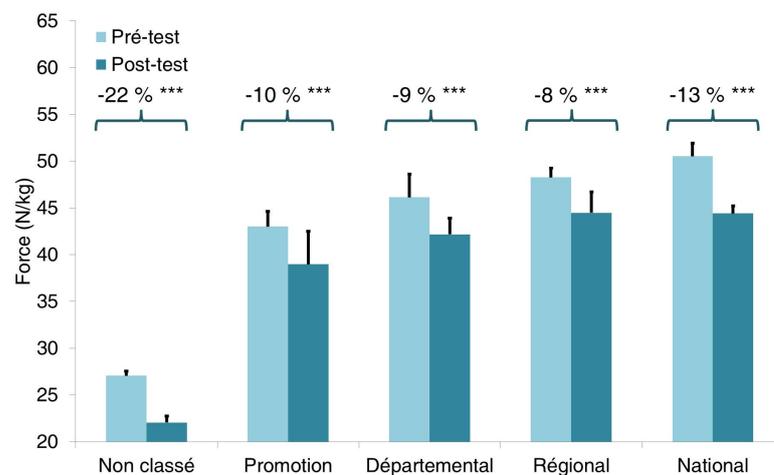


(b) Hauteur du contre-mouvement jump

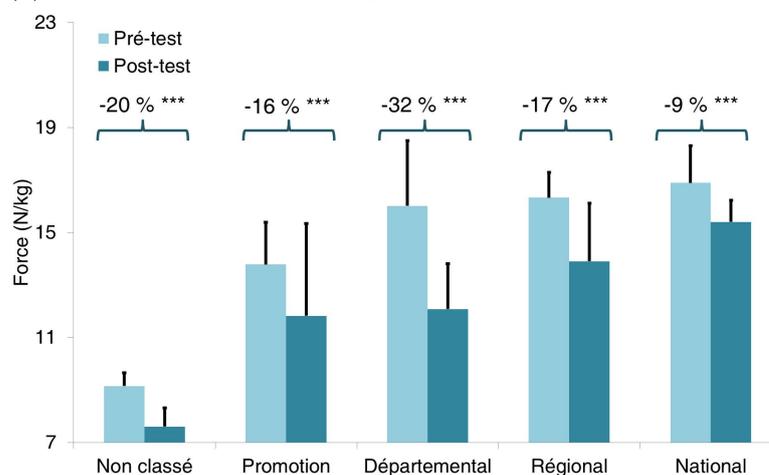


(c) Hauteur du leg stiffness

FIGURE 2.8 – Hauteur des différents sauts (SJ, CMJ et LS) pré- et post-test



(a) Évolution de la force de préhension de la main



(b) Évolution de la force de préhension des doigts

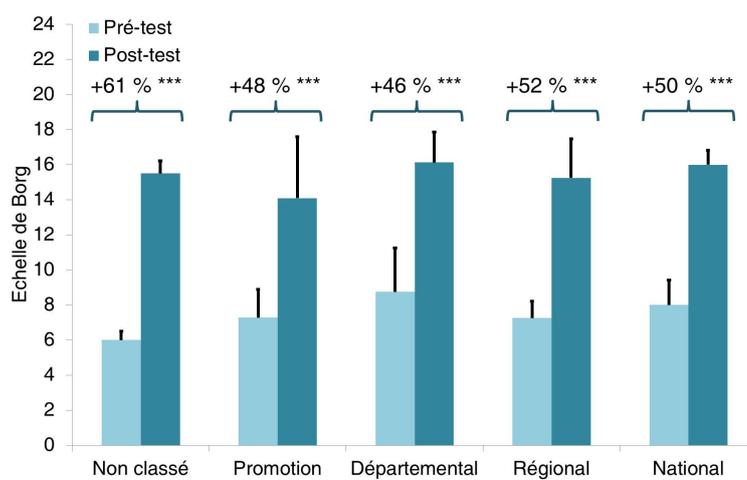
FIGURE 2.9 – Évolution de la force de préhension (handgrip et finger grip) pré- et post-test

Variable	Pré-test	Post-test	$p$	% de diminution
SJ Hauteur (cm)	34.5 (4.5)	31.8 (5.9)	< 0.001	-7.9
SJ Puissance (W/kg)	44.7 (8.2)	42.2 (8.2)	< 0.05	-5.5
CMJ Hauteur (cm)	39.6 (6.1)	36.7 (5.9)	< 0.001	-7.24
CMJ Puissance (W/kg)	40.5 (11.3)	39.0 (9.4)	< 0.05	-4.1
LS Hauteur (cm)	33.3 (6.4)	30.4 (7.9)	< 0.001	-8.8
Hand Grip (N)	47.4 (9.9)	43.2 (9.5)	< 0.001	-13.9
Finger Grip (N)	14.7 (6.1)	12.7 (4.5)	< 0.001	-8.7

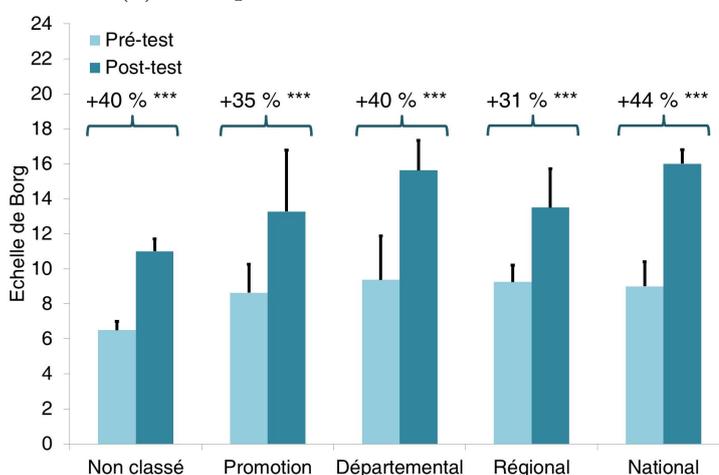
TABLEAU 2.6 – Résultats des variables neuromusculaires durant le test

### 2.3.3.4 Résultat des demandes psychologiques

Au cours de notre expérimentation, nous avons pu observer une augmentation significative de la perception de l’effort central et périphérique pré- et post-test de tous les joueurs en mélangeant les niveaux d’expertise ( $p < 0.001$ ). Plus spécifiquement, les joueurs ont tendance à percevoir la difficulté de leurs efforts comme plus difficiles (figure 2.13). De plus les résultats montrent une corrélation entre la perception centrale et périphérique de la fatigue ( $R = 0.84$ ;  $p < 0.001$ ).



(a) Perception de l’effort central



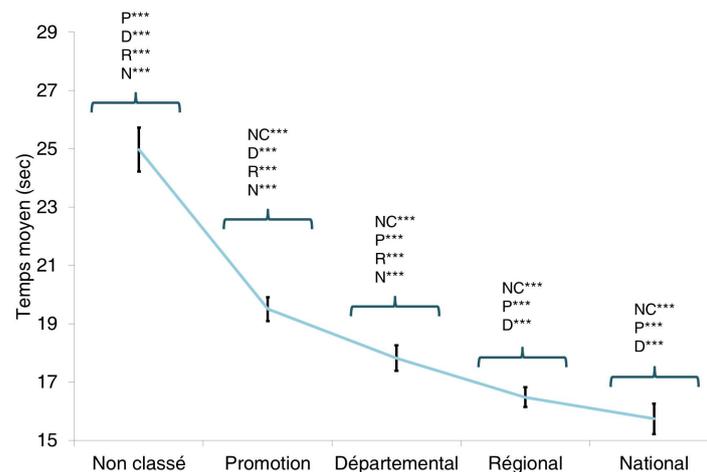
(b) Perception de l’effort périphérique

FIGURE 2.10 – Perception de l’effort centrale et périphérique pré- et post-test, avec \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$  et \*\*\*  $p < 0.001$

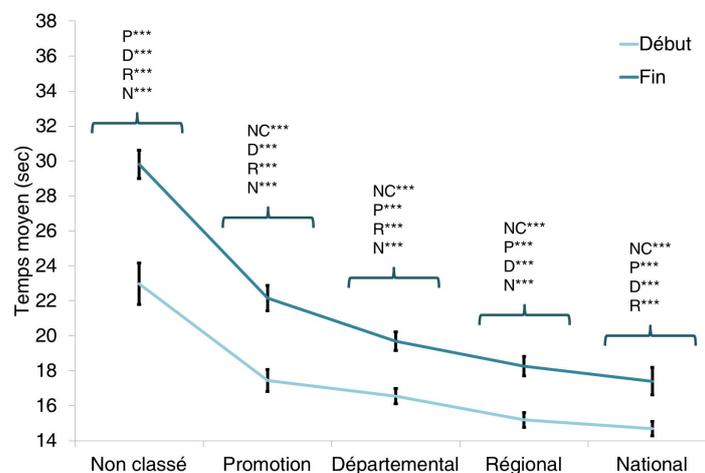
### 2.3.3.5 Résultat du test MRSAB

La performance durant le test est comprise entre 14.6 sec et 26.1 sec avec une moyenne de 17.6 (2.1) sec. La réalisation du test avec des temps faibles est corrélée au

niveau d’expertise des joueurs ( $p < 0.001$ ). La figure 2.11a montre les valeurs moyennes des joueurs selon le niveau d’expertise. Au cours du test, le temps du premier passage et du dernier passage augmente significativement et d’un même niveau quelque soit le niveau d’expertise ( $p < 0.001$ ) (figure 2.11b). La figure 2.12 montre l’évolution des différents temps selon le niveau d’expertise des joueurs.



(a) Temps moyen selon le niveau



(b) Temps du début et fin de test selon le niveau

FIGURE 2.11 – Temps du début et à la fin du test et temps moyenné selon le niveau, avec \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$  et \*\*\*  $p < 0.001$

Les résultats de l’indice de fatigue (FI) sont corrélés avec le niveau d’expertise des joueurs ( $p < 0.001$ ). La figure 2.13a montre les valeurs moyennes des joueurs selon le niveau d’expertise. En complément de cela, les résultats du pourcentage de perte de performance viennent renforcer la différence selon le niveau ( $p < 0.001$ ) (figure 2.13b).

Les résultats montrent que la fréquence des appuis et la variation selon le niveau

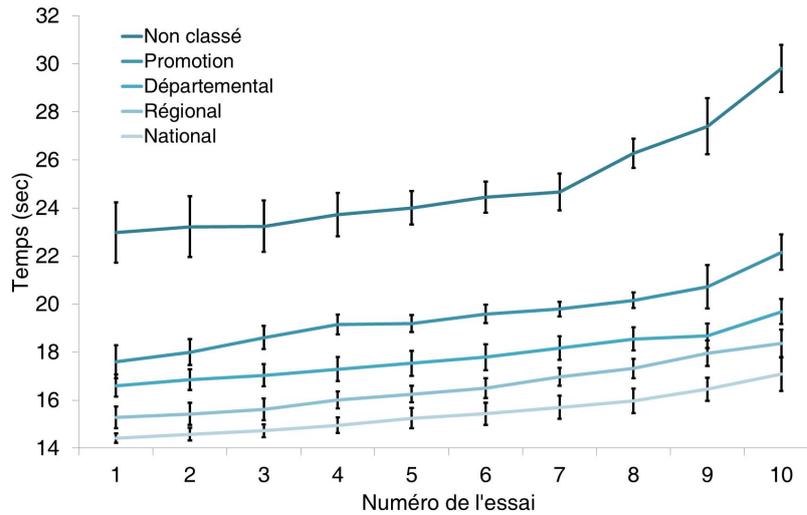
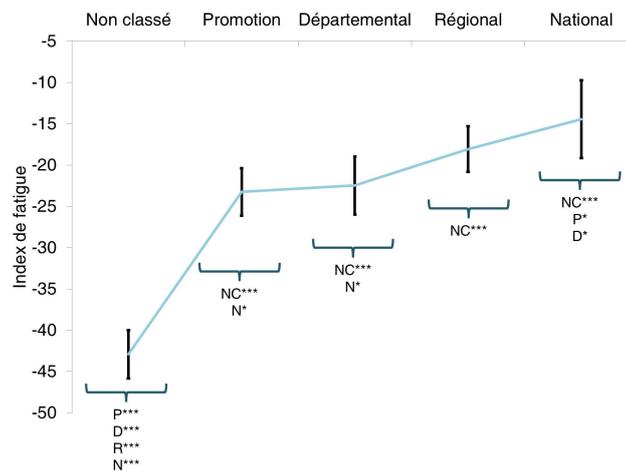
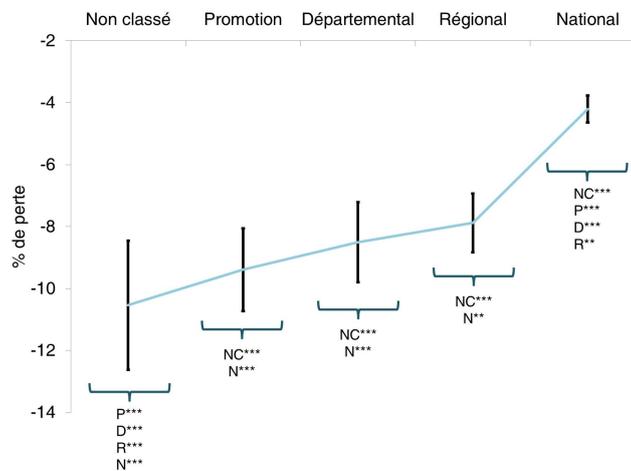


FIGURE 2.12 – Évolution des temps entre chaque essai du test



(a) Index de fatigue selon le niveau



(b) Pourcentage de perte selon le niveau

FIGURE 2.13 – Index de fatigue et pourcentage de perte selon Girard *et al.* [2011], avec \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$  et \*\*\*  $p < 0.001$

d’expertise est significative surtout chez les non classés et les promotions ( $p < 0.01$ ). Cependant, la fréquence des appuis et la variation entre le premier et le dernier essai reste la même dans chaque niveau ( $p > 0.05$ ) (figure 2.14).

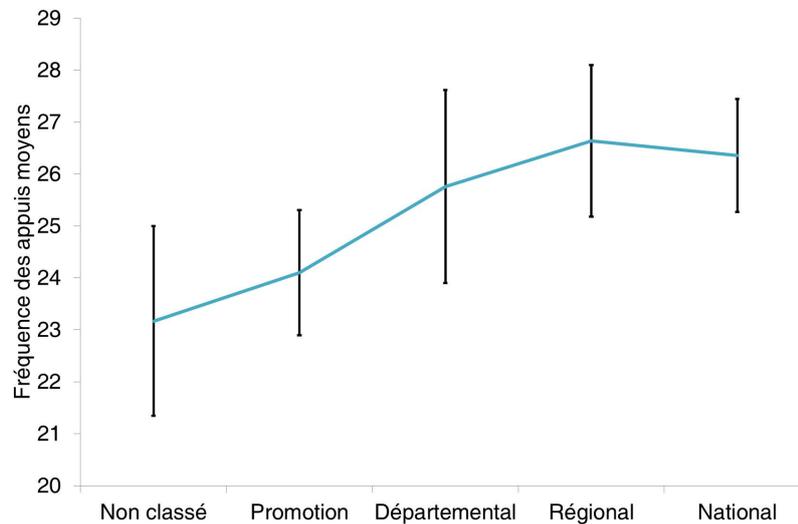


FIGURE 2.14 – Fréquences moyennes des appuis selon le niveau

### 2.3.3.6 Résultat selon la vitesse du volant

Les résultats montrent que la vitesse du volant augmente selon le niveau d’expertise ( $p < 0.001$ ) (figure 2.15).

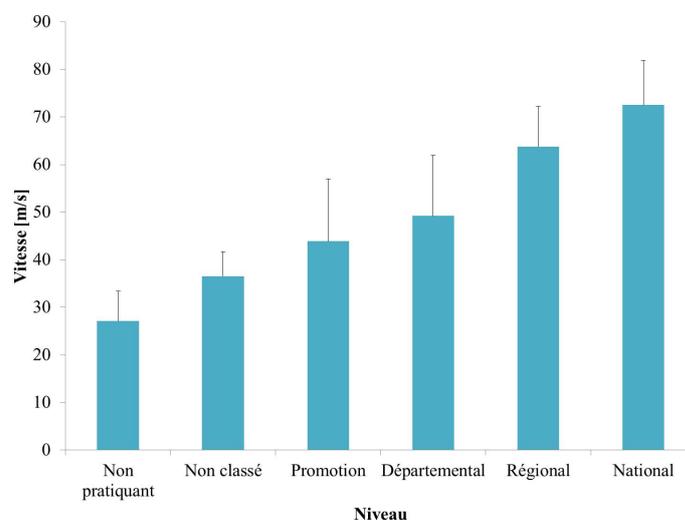


FIGURE 2.15 – Vitesse de volant selon le niveau lors du test MRSAB

## 2.3.4 Discussion

### 2.3.4.1 Variables physiologiques au cours du test

Au cours de notre expérimentation, nous avons étudié l’évolution du lactate sanguin pré- et post-test. Nos résultats montrent une augmentation significative du taux de concentration passant de 2.0 (1.6) mmol/L à 11.3 (2.9) mmol/L ( $p < 0.001$ ). Le niveau d’expertise n’influe en rien sur l’augmentation du lactate ( $p > 0.05$ ).

Le badminton est une activité intermittente amenant les joueurs à répéter des sprints séquencés par des temps repos (le repeatability sprint ability ou RSA). En comparant nos résultats avec ceux de la littérature scientifique, en particulier un test reproduisant des efforts intermittents en basket-ball qui relève une moyenne d’un lactate sanguin de 14.2 mmol [Castagna *et al.*, 2008]. Nous constatons que cette valeur est supérieure à celle que l’on obtient dans notre étude. Cependant, nos résultats se rapprochent de ceux de l’étude de Chin *et al.* [1995] relevant une concentration à 10.4 mmol/L. La participation modérée de la filière anaérobie lactique peut expliquer le haut niveau aérobie des participants, permettant le tamponnement de l’apparition du lactate. Cependant, aucune différence n’est observée entre les joueurs non-classés ainsi que promotions et les nationaux. La capacité aérobie étant inférieure pour les nationaux, le taux de lactatémie devrait être supérieur chez le novice. Une autre explication pourrait être le retard de la prise de lactate qui ne représente donc pas le pic obtenu à la fin du test. La prise de lactate s’effectuait 30 secondes à 1 minute après l’arrêt de l’effort. Ce délai pourrait expliquer une valeur inférieure à celle normalement produite durant l’effort.

Au cours de notre étude, la fréquence cardiaque des joueurs est avoisine les 90 % de la fréquence cardiaque maximale des joueurs. Ces résultats sont proches de ceux que l’on peut trouver dans la littérature scientifique ( $\approx 90$  %) durant un match de badminton [Cabello *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2011; Docherty, 1982; Faude *et al.*, 2007; Ghosh, 2008; Majumdar *et al.*, 1997; Ooi *et al.*, 2009; Phomsoupha et Laffaye, 2015]. Ainsi, notre test reproduit la contrainte cardio-vasculaire durant un match, attestant de sa similitude avec une situation écologique. Les résultats suggèrent que l’énergie produite provient en particulier de la glycolyse anaérobie et du métabolisme aérobie. La littérature souligne l’utilisation de 60 - 70 % du système aérobie et 30 % du système

anaérobie. Les hautes valeurs cardiaques induisent des capacités d’endurance importantes chez les participants. Cependant, elles ne sont pas révélatrices du maintien ou de la diminution de la performance des non-classés et des promotions. Chez les joueurs entraînés, les adaptations physiologiques permettent de retarder l’apparition de la fatigue afin de maintenir la performance. De plus, le test se rapproche des conditions de match et peuvent être comparé aux valeurs que l’on peut trouver en match.

#### 2.3.4.2 Variables neuromusculaires au cours du test

Au cours du test, les participants ont réalisé différents types de saut (SJ et CMJ) et les hauteurs ont été relevées sur le tableau 2.6. Une perte de hauteur de -7.9 % lors d’un SJ et de -7.3 % lors d’un CMJ a été relevée. Nos valeurs sont légèrement inférieures à celles retrouvées dans l’étude [Abián-Vicén et al. \[2012\]](#) avec des joueurs espagnols. Cela est dû à la méthodologie permettant aux joueurs d’utiliser leurs bras durant le saut. Dans notre étude, les bras et les mains sont fixés au niveau des hanches afin d’étudier uniquement la sollicitation des membres inférieurs.

De plus, les valeurs relevées dans notre expérimentation sont proches des valeurs que l’on peut retrouver dans la littérature lors d’un match prolongé de tennis [[Girard et al., 2006](#)]. Il est aussi possible de noter une diminution de la puissance en SJ (-5.5 %) et en CMJ (-4.1 %) pré- et post-test. Précédemment, nous avons observé que les premiers effets de la diminution de la puissance se produisaient à partir de 50 minutes chez les joueurs de badminton. Cet indicateur nous permet d’anticiper la perte de la puissance neuromusculaire lors des différents sauts si le match dépassait les 50 minutes et même durant une compétition complète.

Les participants à l’expérimentation se sont déplacés rapidement et ont effectué des fentes sur l’ensemble du terrain. Cette répétition a amené une fatigue musculaire sur les membres inférieurs. De ce fait, l’analyse de la raideur des joueurs permet de comprendre la diminution et la stabilisation de la performance au cours du temps. Néanmoins, cette dernière a été très peu étudiée en badminton.

Notre étude relève des valeurs moyennes de la raideur des pratiquants en pré-test de  $\approx 43.9$  (20.6) kN/m et en post-test de  $\approx 36.3$  (20.7) kN/m. Le tableau 2.7 montre

les différences selon le niveau d’expertise dans l’activité. Lorsque les joueurs ont un niveau d’expertise plus important, la raideur augmente. Celle-ci est un facteur de performance. En comparant avec la littérature, les résultats chiffrés de notre étude sont plus élevés que ceux obtenus au tennis pour un groupe hétérogène (18.2 kN/m à 34.8 kN/m) [Durand *et al.*, 2010; Marquiritain, 2013]. L’une des premières explications pourrait provenir du matériel utilisé pour mesurer la raideur. Dans notre expérimentation, nous relevions nos données à l’aide d’un accéléromètre alors que pour celles des études précédentes était employée une plateforme de force ou un ergojump. De plus, le matériel de notre étude surestime légèrement la raideur ( $\approx 8$  kN/m) [Choukou *et al.*, 2014].

Variable	Non-classé		Promotion		Départemental		Régional		National	
	Pré-test	Post-test	Pré-test	Post-test	Pré-test	Post-test	Pré-test	Post-test	Pré-test	Post-test
Raideur (kN/m)	22.9 (8.7)	17.9 (8.9)	33.0 (13.5)	23.3 (10.3)	32.7 (12.2)	23.8 (11.5)	58.6 (5.9)	51.8 (6.6)	72.5 (4.5)	64.7 (5.6)
Perte	-22.1 %		-29.6 %		-27.3 %		-11.3 %		-10.7 %	

TABLEAU 2.7 – Résultats de la raideur pré- et post-test

Malgré les différences méthodologiques, les joueurs de badminton semblent avoir un niveau de raideur plus important que les joueurs de tennis d’un niveau équivalent. Les changements de directions par les phases de pré-étirements ou selon le principe d’étirement-renvoi, les accélérations et le nombre croissant de smashes en extension peuvent expliquer le renforcement de la raideur [Bowyer, 2010; Hensley et Paup, 1979; Kroner *et al.*, 1990].

Au cours de l’expérimentation, la raideur joue un rôle déterminant dans la phase de “reprise d’appui” et de “changement de direction”. La reprise d’appui effectuée par les joueurs permet d’augmenter la vitesse du renvoi élastique tout en réduisant le temps de contact avec le sol. La raideur est significativement supérieure chez les régionaux et les nationaux ( $p < 0.01$ ). Cela renforce l’idée que les joueurs à partir de ce niveau utilisent les propriétés viscoélastiques de leur membre inférieur dans le but d’augmenter la raideur et ainsi augmenter leur propre raideur musculaire.

Durant l’expérimentation, la raideur des joueurs diminue significativement de -18 % entre le pré- et le post-test ( $p < 0.001$ ) de manière générale et selon les niveaux des

joueurs. Afin de limiter la diminution de la performance, l’organisme adapte ses besoins neuromusculaires dans le but de maintenir la performance. Selon Choukou *et al.* [2012], le système nerveux central génère de nouveaux schémas de contrôle pour maintenir la raideur. De plus, la modification de l’organisation du mouvement mobilise d’autres muscles et permet de limiter les effets de la fatigue neuromusculaire.

Très peu d’études se sont intéressées au changement de la force de préhension lors de la pratique en badminton. Les valeurs de notre étude sont relevées sur le tableau 2.6. Elles sont proches de la littérature en comparaison avec l’étude d’Abián-Vicén *et al.* [2012] ( $\approx 47$  kg) et de celles de joueurs de tennis expérimentés (entre 46.5 et 61 kg) [Kafkas *et al.*, 2014]. Cependant, un résultat inattendu va à l’inverse de l’hypothèse de départ. En effet, le test génère une fatigue neuromusculaire générale et non ciblée puisque nos résultats montrent une diminution significative des muscles de préhension de la main (-8.7 % pour le hand grip et -13.9 % pour le finger grip). Le maintien de la raquette au cours du test provoque une fatigue même minime sur les muscles de préhension.

### 2.3.4.3 Variables psychologiques au cours du test

Les résultats obtenus montrent que le test génère une fatigue proche de celle que l’on peut obtenir durant un match. La fatigue mentale entraînée par le test n’influe pas sur la motivation durant l’expérience. Les encouragements permettent de limiter la dégradation de la motivation et ainsi de la performance [Guyatt *et al.*, 1984]. Afin de comprendre l’effet négatif de la perception de l’effort est mesuré pendant l’expérimentation. Au cours du test, l’augmentation de la perception de l’effort central et périphérique est significative. Durant le pré-test, elle présente des valeurs de 7.4 (1.8) et 8.8 (1.9), qui vont jusqu’à 15.1 (2.7) et 13.9 (2.8) lors du post-test ( $p < 0.001$ ). Aucune différence n’a été relevée entre les participants selon le niveau. Il existe une corrélation forte entre l’augmentation de la perception de l’effort central et l’augmentation de la perception périphérique ( $R = 0.81$  ;  $p < 0.001$ ).

Au cours du test, les participants se fatiguent mentalement et atteignent leur niveau maximal d’effort perçu, alors ils se désengagent dans la tâche physique. Les résultats concordent avec le fait que les joueurs décident de réduire leur effort, voir de se désen-

gager d’une tâche perçue comme trop exigeante ou trop difficile, quand l’effort dépasse la limite “d’acceptabilité” qu’ils sont prêts à réaliser [Wright, 2008b]. Cette perception semble toucher plus particulièrement les non-classés aux départementaux, puisque leur performance décroît fortement. Cela peut être expliqué par l’interférence de la naloxone (antagoniste opioïde) [Sgherza *et al.*, 2002] avec la dopamine (neurotransmetteur impliqué dans la prise de décision selon l’effort), [Salamone *et al.*, 2007] qui augmente la perception de l’effort et réduit la performance face à la difficulté.

À l’inverse, la fatigue mentale peut augmenter la réponse à l’effort comme étant un défi à la performance. Cela a pour incidence de réduire le niveau de difficulté de la tâche à laquelle les joueurs font face et permettre de conserver une performance élevée [Wright, 2008a; Wright *et al.*, 2007]. Chez les régionaux et les nationaux, la performance est maintenue face à la difficulté de l’effort alors que les ressources physiologiques sont dégradées identiquement. Durant le test, il semble que la performance a été limitée plutôt par la perception de l’effort que par la limitation cardio-respiratoire ou vasculaire [Sgherza *et al.*, 2002].

#### 2.3.4.4 Performance au cours du test

Notre étude s’intéresse à la discrimination des niveaux d’expertise à partir d’un test mettant en avant un effort intermittent et des déplacements spécifiques au badminton. Nos résultats montrent que les joueurs ayant une meilleure expertise de l’activité ont des niveaux de performance plus importants. Ainsi le test permet d’avoir une première approche du niveau d’un joueur et de pouvoir le “classer”.

Le test effectué par les joueurs montre une diminution de la performance au cours de la répétition des déplacements. Afin de limiter au maximum les effets de l’apprentissage qui peuvent apparaître au cours du test, les participants répétaient autant de fois qu’ils le souhaitaient les déplacements [Hopkins, 2000]. La variabilité au cours du dernier essai est fortement influencée par le fait que celui-ci est le dernier du test. Ainsi les joueurs ne s’économisent plus en vue de tenir durant tout le test et les encouragements ont aussi une forte influence sur ce dernier essai [Guyatt *et al.*, 1984].

Pour stabiliser leur performance, les joueurs modifient la fréquence et l’amplitude

de leurs appuis pour se déplacer sur le terrain. En analysant de plus près, il est possible d’observer deux stades communs pour l’ensemble des niveaux et un stade supplémentaire pour les non-classés. Le premier stade propre aux non-classés se situe du 1er au 4ème essai où le nombre d’appui diminue. Cela peut-être expliqué par une phase d’apprentissage ou d’adaptation à la tâche afin de trouver la fréquence d’appuis la plus efficiente [Hopkins, 2000]. La phase commune est une phase de stabilisation des appuis. Les joueurs adoptent un comportement spécifique reproductible permettant de maintenir la performance et de ne pas perdre en vitesse. Cependant, ce maintien semble avoir un coût énergétique important amenant aux derniers stades où le nombre d’appuis diminue dans les derniers essais du test. L’amplitude prime ainsi sur la fréquence des appuis [Girard *et al.*, 2011].

L’effet de l’apprentissage influence le nombre d’appuis selon les niveaux d’expertise. Les non-classés et les promotions ont un nombre d’appuis moins important que les départementaux, les régionaux et les nationaux (tableau 2.8 et que ces derniers ont un nombre d’appuis assez proche. L’apprentissage a amené les joueurs à développer une fréquence d’appuis plus importante afin d’être plus efficaces. À l’inverse, les non-classés et les promotions privilégient l’amplitude, qui réduit le nombre d’appuis.

Niveau	Appui moyen	Appui total
Non-classé	23.2 (3.6)	247.3 (19.9)
Promotion	24.1 (2.4)	242.3 (41.5)
Départemental	25.8 (3.7)	266.5 (41.5)
Régional	26.6 (2.9)	273.2 (36.8)
National	26.4 (2.1)	275.1 (15.9)

TABLEAU 2.8 – Nombre d’appui moyen et total durant le test

La fréquence et l’amplitude des appuis modifient le temps de déplacement vers les différentes cibles. Lors du test, il est important de distinguer la phase “vers la cible périphérique” (phase de déplacement) et la phase “vers la cible centrale” (phase de remplacement). La figure 2.16 montre les différents temps vers la cible centrale (retour) et périphérique (avant et arrière droit et gauche). Généralement les temps de déplacements et de replacements sont assez proches. Les déplacements suivent la logique des niveaux, ainsi plus le niveau est élevé, plus le déplacement est effectué rapidement.

CHAPITRE 2. LE “MULTIDIRECTIONAL REPEATED SPRINT ABILITY FOR BADMINTON” : UN TEST FIABLE ET DISCRIMINANT DE L’EXPERTISE ?

Cible	Tour	Non-classé	Promotion	Départemental	Régional	National
Avant droit	Tour 1	1241.1 (174.2)	1105.1 (95.8)	1004.8 (128.1)	936.9 (148.7)	796.9 (91.2)
	Tour 2	1305.8 (188.7)	1022.4 (98.6)	972.7 (135.2)	951.9 (198.7)	809.5 (146.8)
	Perte	-4.9 %	-8.1 %	-3.3 %	-1.6 %	-1.5 %
Retour av droit	Tour 1	1224.9 (228.9)	937.8 (123.6)	990.2 (141.9)	795.2 (105.8)	781.3 (74.6)
	Tour 2	1371.5 (370.8)	1029.9 (206.9)	950.1 (112.6)	801.7 (101.5)	797.6 (98.2)
	Perte	-11.9 %	-9.8 %	-4.2 %	-0.8 %	-2.0 %
Avant gauche	Tour 1	1297.1 (370.8)	1032.1 (129.4)	928.5 (139.5)	810.4 (160.7)	797.1 (142.6)
	Tour 2	1371.3 (203.8)	999.4 (55.2)	902.7 (119.7)	902.4 (172.5)	807.9 (180.5)
	Perte	-5.4 %	-3.3 %	-2.8 %	-11.4 %	-1.4 %
Retour av gauche	Tour 1	1350.1 (112.4)	989.3 (107.6)	964.8 (82.9)	900.9 (166.4)	860.8 (114.7)
	Tour 2	1424.1 (90.8)	1072.4 (157.5)	977.7 (142.8)	908.9 (107.7)	876.7 (140.5)
	Perte	-5.2 %	-7.8 %	-1.4 %	-0.9 %	-1.9 %
Arrière gauche	Tour 1	1240.4 (248.8)	1021.1 (228.5)	971.7 (98.5)	944.6 (113.6)	933.8 (68.6)
	Tour 2	1252.8 (369)	1087.2 (166.8)	1004.9 (120.2)	968.9 (91.0)	958.1 (72.5)
	Perte	-0.9 %	-6.1 %	-3.3 %	-2.5 %	-2.5 %
Retour ar gauche	Tour 1	1184.3 (197.9)	1084.54 (93.6)	1000.1 (129.7)	955.0 (140.9)	940.4 (142.9)
	Tour 2	1311.0 (250.7)	1085.2 (133.5)	1020.21 (99.8)	975.0 (116.5)	983.1 (153.6)
	Perte	-9.7 %	-0.1 %	-2.0 %	-2.1 %	-4.3 %
Arrière droit	Tour 1	1139.8 (330.2)	1039.1 (237.7)	956.9 (102.3)	899.0 (139.9)	842.4 (109.4)

Cible	Tour	Non-classé	Promotion	Départemental	Régional	National
	Tour 2	1250.5 (307.6)	1087.4 (118.3)	983.6 (118.6)	962.1 (100.9)	890.9 (80.7)
	Perte	-8.9 %	-4.4 %	-2.7 %	-6.6 %	-5.4 %
Retour ar droit	Tour 1	1283.7 (315.5)	991.9 (149.2)	946.7 (101.6)	871.4 (110.6)	856.6 (89.4)
	Tour 2	1365.0 (271.2)	1042.4 (125.9)	974.6 (80.2)	979.2 (144.5)	913.1 (85.7)
	Perte	-5.9 %	-4.8 %	-2.9 %	-12.4 %	-6.6 %

TABLEAU 2.9 – Temps moyen et perte (%) lors du premier et le second d’un essai

Tous les déplacements amènent les joueurs à réorienter leurs appuis et générer un changement de direction de 90°. Les déplacements en badminton sont multiples et propres à chaque niveau d’expertise. Aucune consigne liée à la fréquence ou à l’amplitude n’a été donnée aux joueurs. Ainsi, les non-classés privilégient une grande amplitude alors que les promotions à nationaux favorisent la fréquence. Au cours de cette analyse, nous orienterons davantage notre discussion autour d’un joueur droitier. Cependant, les mêmes réponses ont été obtenues avec un gaucher. Lors du déplacement vers la cible 1 (avant droit), les joueurs utilisent avant tout leur jambe droite pour se déplacer et se replacer par l’utilisation de pas chassés. Cela permet aux joueurs de ne pas avoir de grande décélération et ainsi de maintenir une grande vitesse sans avoir de changements d’appuis. Lors du déplacement vers la cible 2 (avant gauche), les joueurs modifient leur schéma de déplacement lors de la reprise d’appui en utilisant avant tout la jambe opposée à la raquette pour initier le mouvement. Cette modification a pour incidence de leur permettre d’effectuer un pas couru qui semble être plus rapide pour atteindre la cible. Cependant, le remplacement est plus long que précédemment puisque le déplacement arrière en pas couru ralentit le joueur.

Pour aller le plus rapidement sur la cible arrière gauche, les joueurs expérimentés ont davantage utilisé un déplacement avec une frappe en revers. Les participants en phase d’apprentissage ont quant à eux conservé la même disposition que les déplacements avants avec l’utilisation de pas chassés. Lorsque le joueur se replace après avoir touché la cible 2, il effectue une rotation du bassin pour se placer comme pour réaliser

un revers. Cela a pour conséquence d’augmenter le temps vers la cible puisque cela modifie le temps des appuis, cependant, cette action est compensée par la réalisation par la suite d’un pas couru.

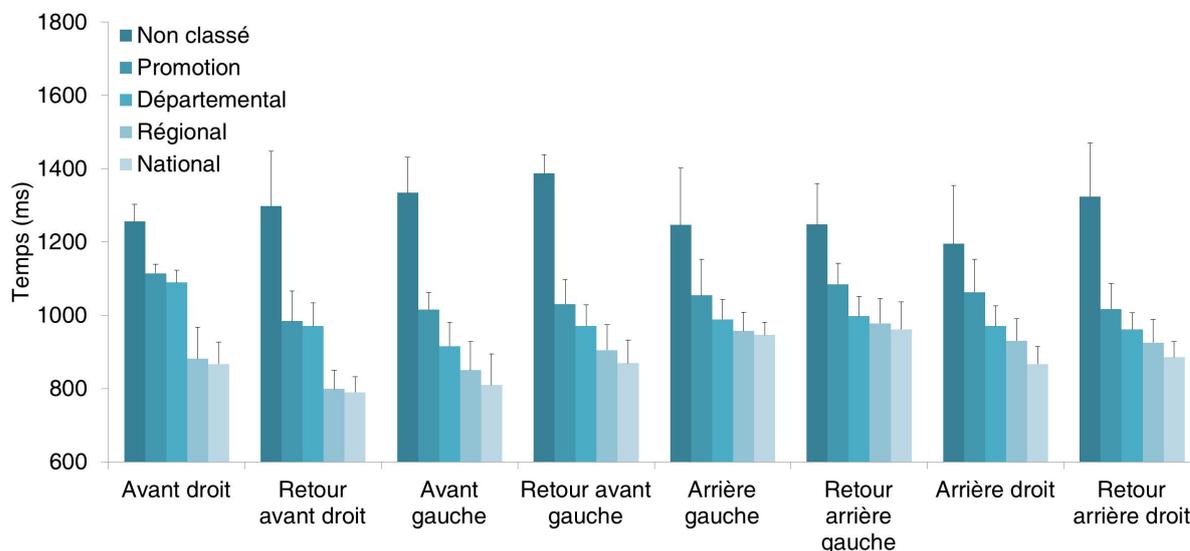


FIGURE 2.16 – Temps moyens mis pour atteindre chaque cible selon le niveau

L’analyse du temps des déplacements entre le “premier” tour et le “second” tour du même essai nous permet d’observer l’influence de la fatigue. Le tableau 2.9 récapitule les différents temps sur les deux tours. La fatigue augmente significativement entre le premier et le deuxième tour ( $p < 0.01$ ). La forte intensité et le manque de temps de repos ne permettent pas de maintenir tout au long de l’essai la conservation du temps. La fatigue impacte négativement les déplacements et les fentes. Les accélérations et les décélérations nécessitent un apport énergétique important réduisant la performance.

L’expertise de la vitesse du volant corrélée avec le test MRSAB montre une forte complémentarité ( $p < 0.001$ ). Le test de vitesse du volant est complémentaire au test MRSAB et augmente au cours de l’expertise des joueurs ( $p < 0.05$ ). De plus, on remarque à nouveau l’absence d’un “plateau de vitesse” entre les spécialisés et les experts.

#### 2.3.4.5 L’index de fatigue et la décrémentation

L’index de fatigue est un premier indicateur de la diminution de la performance des joueurs liée à la fatigue physique. Cette dernière influence fortement la performance des non-classés. Quand les joueurs des autres niveaux semblent parvenir à conserver une

performance tout au long du test. Cependant, il est important de préciser que l’index de fatigue ne souligne pas l’évolution du test au cours du temps mais la différence entre le meilleur temps et le pire.

Pour renforcer notre analyse, la décrémentation des 10 essais au cours du test permet d’observer la diminution de la performance des joueurs. L’intérêt de cette méthode est de pouvoir prendre en compte l’ensemble des essais et d’observer l’évolution de la performance au cours du test [Girard *et al.*, 2011]. Nos résultats montrent qu’il y a une décrémentation importante entre les non-classés et les nationaux. La figure 2.13b montre que les non-classés ont un taux plus important de perte de performance que les autres joueurs. De plus, les nationaux sont capables de maintenir un haut niveau d’intensité, limitant ainsi la diminution de leur performance.

La fatigue joue un rôle essentiel dans la diminution de la performance. Nos résultats montrent que les joueurs non-classés n’arrivent pas à tenir leur performance du début jusqu’à la fin du test. Plus on monte en niveau, plus les joueurs stabilisent leur performance au cours du temps. Ainsi les joueurs sont capables de répéter un effort important durant tout le test. Cela peut être identique en match lors d’échanges intenses pendant lesquels les joueurs doivent continuer à maintenir un haut niveau de performance. Ainsi l’expertise permet de maintenir la performance.

Pour conclure, cette étude met en avant la caractérisation d’un joueur de badminton selon des critères de déplacement sur le terrain. Les joueurs nationaux obtiennent les meilleurs temps comparés aux joueurs non-classés, lié à leur déplacement plus performant. De plus, les joueurs nationaux stabilisent leur performance au cours du temps et limitent ainsi la diminution de leur performance à l’inverse des non-classés où l’on peut observer une plus grande variabilité inter-essai durant le test.

En complément, ce test ne se limite pas à une utilisation en laboratoire mais il peut aussi être utilisé comme étant un test spécifique en badminton pour les entraîneurs. Permettant d’obtenir une première évaluation des joueurs et de leur évolution au cours du temps et des entraînements.

## 2.4 Références

- ABIÁN, V. P., ABIÁN-VICÉN, J. et SAMPEDRO MOLINUEVO, J. (2012). Anthropometric analysis of body symmetry in badminton players. *International Journal of Morphology*, 30(3):945–951. [55](#), [58](#)
- ABIAN-VICEN, J., CASTANEDO, A., ABIAN, P., GONZALEZ-MILLAN, C., SALINERO, J. J. et del COSO, J. (2013). Influence of successive badminton matches on muscle strength, power, and body fluid balance in elite players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(4):689–694. [49](#), [50](#)
- ABIAN-VICEN, J., CASTANEDO, A., ABIAN, P. et SAMPEDRO, J. (2013). Temporal and notational comparison of badminton matches between men’s singles and women’s singles. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 13(2):310–320. [49](#), [51](#)
- ABIÁN-VICÉN, J., DEL COSO, J., GONZÁLEZ-MILLÁN, C., SALINERO, J. J. et ABIÁN, P. (2012). Analysis of dehydration and strength in elite badminton players. *PLoS One*, 7(5):1–8. [48](#), [53](#), [57](#), [76](#), [78](#)
- ÁLVAREZ, R., CAMPOS, D. C. et PORTES, P. (2012). Analysis of the physiological parameters of junior spanish badminton players. pages 1–10. [48](#), [50](#), [53](#), [55](#), [57](#), [58](#)
- AMRI, S., FAZIL UJANG, A., ROZILEE WAZIR NORJALI WAZIR, M. et NAIM ISMAIL, A. (2012). Anthropometric correlates of motor performance among Malaysian university athletes. *Movement, Health and Exercise*, 1(1):76–92. [48](#), [49](#), [50](#), [57](#)
- AMUSA, L. O., TORIOLA, A. L., DHALIWAL, H. S. et MOKGWATHI, M. M. (2001). Anthropometric Profile of Botswana Junior National Badminton Players. *Journal of Human Movement Studies*, 40(2):115–128. [48](#)
- BANGSBO, J., IAIA, F. M. et KRUSTRUP, P. (2008). The yo-yo intermittent recovery test intermittent sports. *Sports Medicine*, 38(1):37–51. [59](#)
- BARTUNKOVA, S., SAFARIK, V., MELICHAROVA, E., BARTUNEK, Z., SELIGER, V. et BURES, J. (1979). Energetic ky Vydažu badmintonu. *Teorie a praxe telesné vychovy*, 27(6):369–372. [48](#), [49](#), [50](#)

- BAUM, K., HOY, S., LEYK, D., PAPADOPOULOS, P. et ESSFELD, D. (1998). Energetische Leistungsfähigkeit im Badminton – Vergleich von Laufbandergometrie und einem sportspezifischen Test. In JESCHKE, D. et LORENZ, D., éditeurs : *Sportspezifische Leistungsdiagnostik – Energetische Aspekte*, volume 18, pages 233–242. Bundesinstitut für Sportwissenschaft, Köln. 59
- BEGON, M. et LACOUTURE, P. (2005). Anthropometric modeling for a sport mechanical analysis. Part 2 : joint center estimation and skeletal kinematics determination. In SCIENCES, E., éditeur : *Movement and Sport Sciences*, pages 35–60. 47
- BORG, G., LJUNGGREN, G. et CECI, R. (1985). The increase of perceived exertion, aches and pain in the legs, heart rate and blood lactate during exercise on a bicycle ergometer. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 54(4):343–349. 63
- BOTTOMS, L., SINCLAIR, J., TAYLOR, K., POLMAN, R. et FEWTRELL, D. (2013). The effects of carbohydrate ingestion on the badminton serve after fatiguing exercise. *Journal of Sports Sciences*, 30(3):285–293. 59, 60
- BOWYER, G. W. (2010). Adult foot and ankle problems. *InnovAiT*, 3(11):657–670. 77
- CABELLO, D., PADIAL, P., LEES, A. et RIVAS, F. (2004). Temporal and physiological characteristics of elite women’s and men’s singles badminton. *International Journal of Applied Sports Sciences*, 16(2):1–26. 60, 75
- CABELLO MANRIQUE, D. et GONZÁLEZ-BADILLO, J. J. (2003). Analysis of the characteristics of competitive badminton. *British Journal of Sports Medicine*, 37(1):62–66. 60
- CAMPOS, F. A. D., DAROS, L. B., MASTRASCUSA, V., DOURADO, A. C. et STANGANELLI, L. C. R. (2009). Anthropometric profile and motor performance of junior badminton players. *Brazilian Journal of Biomechanics*, 3(2):146–151. 48, 50
- CARTER, J. E. L. (1980). *The Heath-Carter somatotype method*. San diego : édition. 53
- CARTER, J. E. L. (2002). *The Heath-Carter anthropometric somatotype*. 54

- CARTER, J. E. L. et HEATH, B. H. (1990a). Recapitulation and new directions. In CARTER, J. et HEATH, B. H., éditeurs : *Somatotyping - Development and Applications*, pages 340–345. Cambridge University Press. [47](#), [50](#), [53](#), [54](#), [58](#)
- CARTER, J. E. L. et HEATH, B. H. (1990b). *Somatotyping development and applications*. Press Syndicate of the University of Cambridge, cambridge édition. [55](#)
- CASTAGNA, C., ABT, G., MANZI, V., ANNINO, G., PADUA, E. et DÓTTAVIO, S. (2008). Effect of recovery mode on repeated sprint ability in young basketball players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(3):923–929. [75](#)
- CHELLY, S. M. et DENIS, C. (2001). Leg power and hopping stiffness : relationship with sprint running performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(2):326–333. [66](#)
- CHEN, H. L., WU, C. J. et CHEN, T. C. (2011). Physiological and notational comparison of new and old scoring systems of singles matches in men’s badminton. *Asian Journal of Physical Education and Recreation*, 17(1):6–17. [60](#), [75](#)
- CHEN, T. I., TSAI, P. H., LIN, J. H., LEE, N. Y. et LIANG, M. T. C. (2013). Effect of short-term heat acclimation on endurance time and skin blood flow in trained athletes. *Journal of Sports Medicine*, 4:161–170. [60](#)
- CHIN, M. K., WONG, A. S., SO, R. C., SIU, O. T., STEININGER, K. et LO, D. T. (1995). Sport specific fitness testing of elite badminton players. *British Journal of Sports Medicine*, 29(3):153–157. [59](#), [60](#), [75](#)
- CHOUKOU, M. A., LAFFAYE, G. et HEUGAS-DE PANAFIEU, A. M. (2012). Sprinter’s motor signature does not change with fatigue. *European Journal of Applied Physiology*, 112(4):1557–1568. [78](#)
- CHOUKOU, M. A., LAFFAYE, G. et TAIAR, R. (2014). Reliability and validity of an accelerometric system for jumping performance. *Biology of Sport*, 31(1):55–62. [62](#), [77](#)
- CLAESSENS, A. L., BEUNEN, G. et MALINA, R. M. (2000). Anthropometry, physique, body composition and maturity. In ARMSTRONG, N. et VAN MECHELEN, W., éditeurs : *Pediatric Exercise Science and Medicine*, pages 11–22. Oxford University Press Inc., New York. [47](#)

- COHEN, C., DARBOIS-TEXIER, B., QUÉRÉ, D. et CLANET, C. (2015). The physics of badminton. *New Journal of Physics*, 17(6):1–17. 51
- DALLEAU, G., BELLI, A., VIALE, F., LACOUR, J. R. et BOURDIN, M. (2004). A simple method for field measurements of leg stiffness in hopping. *International Journal of Sports Medicine*, 25(3):170–176. 62
- DOCHERTY, D. (1982). A comparison of heart rate responses in racquet games. *British Journal of Sports Medicine*, 16(2):96–100. 75
- DURAND, S., RIPAMONTI, M., BEAUNE, B. et RAHMANI, A. (2010). Leg ability factors in tennis players. *International Journal of Sports Medicine*, 31(12):882–886. 77
- FAUDE, O., MEYER, T., ROSENBERGER, F., FRIES, M., HUBER, G. et KINDERMANN, W. (2007). Physiological characteristics of badminton match play. *European Journal of Applied Physiology*, 100(4):479–85. 59, 75
- FUCHS, M., FAUDE, O., WEGMANN, M. et MEYER, T. (2014). Critical evaluation of a badminton-specific endurance test. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(2):249–255. 60
- GHOSH, A. K. (2008). Heart rate and blood lactate responses during execution of some specific strokes in badminton drills. *International Journal of Applied Sports Sciences*, 20(2):27–36. 59, 75
- GIRARD, O., LATTIER, G., MICALLEF, J. P. et MILLET, G. P. (2006). Changes in exercise characteristics, maximal voluntary contraction, and explosive strength during prolonged tennis playing. *British journal of sports medicine*, 40(6):521–526. 76
- GIRARD, O., MENDEZ-VILLANUEVA, A. et BISHOP, D. (2011). Repeated-sprint ability – Part I : factors contributing to fatigue. *Sports Medicine*, 41(8):673–694. 64, 73, 80, 84
- GUALDI-RUSSU, E. G., GRUPPIONI, G., GUERESI, P., BELCASTRO, M. G. et MARCHESINI, V. (1992). Skinfolds and body composition of sport participants. *Journal of Sport Medicine and Physical Fitness*, 32:303–313. 47

- GUYATT, G. H., PUGSELY, S. O., SULLIVAN, M. J., THOMPSON, P. J., BERMAN, L., JONES, N. L., FALLEN, E. L. et TAYLOR, D. W. (1984). Effect of encouragement on walking test performance. *Thorax*, 39(11):18–22. 78, 79
- HARMAN, E. A., ROSENSTEIN, M. T., FRYKMAN, P. N., ROSENSTEIN, R. M. et KRAMER, W. J. (1991). Estimates of human power output from vertical jump. *The Journal of Applied Sport Science Research*, 5:116. 62
- HEATH, B. H. et CARTER, J. E. L. (1967). A modified somatotype method. *Journal of Physical Anthropometry*, 27:57–74. 53
- HELLER, J. (2010). Physiological profiles of elite badminton players aspects of age and gender. *British Journal of Sports Medicine*, 44(i17):1–13. 48, 49, 50, 51, 59
- HENSLEY, L. D. et PAUP, D. C. (1979). A survey of badminton injuries. *British Journal of Sports Medicine*, 13(4):156–160. 77
- HOPKINS, W. G. (2000). Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Medicine*, 1:1–15. 79, 80
- HUGHES, M. G. et FULLERTON, F. M. (1995). Development of an on-court aerobic test for elite badminton players. In REILLY, T., HUGHES, M. G. et LEES, A., éditeurs : *Science and Racket Sports*, pages 51–54. London : E and FN Spon. 59
- HUSSAIN, S. (2013). Somatotype and body composition of adolescent badminton players in Kerala. *International Journal of Advanced Scientific and Technical Research*, 6(3):105–111. 50, 53, 55, 57, 58
- ISMAIL, M. S. H., BOON SUEN, A., OTHMAN, C. N., AHMAD, A. et SINGH, R. (1993). Comparison of anthropometric variables and leg strength of volleyball, basketball and badminton players. *Malaysian Journal of Medical Laboratory Science*, 10(1):26–30. 47, 48, 50
- JOSÉ BERRAL DE LA ROSA, F., RODRIGUEZ-BIES, E. C., JAVIER BERRAL DE LA ROSA, C., ROJANO ORTEGA, D. et LARA PADILLA, E. (2010). Comparación de Ecuaciones Antropométricas para Evaluar la Masa Muscular en Jugadores de Badminton. *International Journal of Morphology*, 28(3):803–810. 50

- KAFKAS, M. E., ŞAHİN KAFKAS, A., DURMUS, B. et AÇAK, M. (2014). Effects of a tennis tournament on players’ hand grip strength, pressure pain threshold and visual analogue scale. *Medicina dello sport*, 67(4):569–579. 78
- KRAKOWIAK, H., CABRIC, M., SOKOLOWSKA, E. et LEWANDOWSKI, A. (2008). Body structure and composition of short distance runners. *Polish Journal of Sports Medicine*, 24(1):30–36. 47
- KRONER, K., SCHMIDT, S., NIELSEN, A., YDE, J., JAKOBSEN, B. W., MOLLER-MADSEN, B. et JENSEN, J. (1990). Badminton injuries. *British Journal of Sports Medicine*, 24(3):169–172. 77
- LEE, R. C., WANG, Z., HEO, M., ROSS, R., JANSSEN, I. et HEYMSFIELD, S. B. (2000). Total-body skeletal muscle mass : development and cross-validation of anthropometric prediction models. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 72(3):796–803. 47, 49, 52
- LEGER, L. et LAMBERT, J. (1982). A maximal multi-stage 20m shuttle run test to predict VO<sub>2</sub>max. *European Journal of Applied Physiology*, 49(1):1–12. 59
- LEI, R. R., DENG, S. X. et LU, L. F. (1993). Study on the physiological function, physical quality and mental characteristics of Chinese badminton players. *Chinese Sports Science Technology*, 29:28–38. 47
- LEONE, M., LARIVIERE, G. et COMTOIS, A. S. (2002). Discriminant analysis of anthropometric and biomotor variables among elite adolescent female athletes in four sports. *Journal of Sports Science*, 20(6):443–449. 47
- LIDDLE, S. D., MURPHY, M. H. et BLEAKLEY, W. (1996). A comparison of the physiological demands of singles and doubles Badminton a heart rate and time/motion analysis. *Journal of Human Movement Studies*, 29:159–179. 59
- MAJUMDAR, P., KHANNA, G. L., MALIK, V., SACHDEVA, S., ARIF, M. et MANDAL, M. (1997). Physiological analysis to quantify training load in badminton. *British Journal of Sports Medicine*, 31(4):342–345. 50, 52, 75
- MARQUIRRIAIN, J. (2013). The interaction between the tennis court and the player : how does surface affect leg stiffness ? . *Sports Biomechanics*, 106:857–864. 77

- MATHUR, D. N., TORIOLA, A. L. et IGBOKWE, N. U. (1985). Somatotypes of Nigerian athletes of several sports. *British Journal of Sports Medicine*, 19(4):219–220. [48](#), [49](#), [50](#), [51](#), [53](#), [55](#), [57](#), [58](#)
- MIKKELSEN, F. (1979). Physical demands and muscle adaptation in elite badminton players. In TERAUDS, J., éditeur : *Science in Racquet Sports*, pages 55–67. Academic Publishers, Del Mar, California. [48](#), [49](#), [50](#), [52](#)
- NIKBAKHT, M. (2011). Relationships between somatotype, anthropometry and physical fitness variables in untrained university students. *Journal of Physical Education and Sport*, 11(2):211–214. [47](#)
- NISHIZAWA, M., SATO, H. et IKEDA, Y. (2007). The body composition analyzer by BIA as a self-healthy management tool. *Rinsho byori. The Japanese Journal of Clinical Pathology*, pages 158–164. [50](#), [52](#)
- NORDSTRÖM, A., HÖGSTRÖM, M. et NORDSTRÖM, P. (2008). Effects of different types of weight-bearing loading on bone mass and size in young males : a longitudinal study. *Bone*, 42(3):565–571. [47](#)
- OOI, C. H. et SIDEK, M. (2010). *Physiological strain in world class women badminton player during training and competition : a case study*, volume 3. Isn bullet édition. [48](#)
- OOI, C. H., TAN, A., AHMAD, A., KWONG, K. W., SOMPONG, R., GHAZALI, K. A. M., LIEW, S. L., CHAI, W. J. et THOMPSON, M. W. (2009). Physiological characteristics of elite and sub-elite badminton players. *Journal of Sports Sciences*, 27(14):1591–1599. [48](#), [50](#), [59](#), [60](#), [75](#)
- PHOMSOUPHA, M. et LAFFAYE, G. (2015). The science of badminton : game characteristics, anthropometry, physiology, visual fitness and biomechanics. *Sports Medicine*, 45(4):473–495. [48](#), [52](#), [55](#), [75](#)
- POLISZCZUK, T. et MOSAKOWSKA, M. (2010). Antropometryczny profil elitarnych badmintonistów z polski. *Medycyna Sportowa*, 26(1):45–55. [47](#), [48](#), [49](#), [50](#), [51](#), [52](#), [53](#), [55](#), [57](#), [58](#)

- RAHMAWATI, N. T., BUDI HARJO, S. et ASHIZAWA, K. (2007). Somatotypes of young male athletes and non-athlete students in Yogyakarta, Indonesia. *Anthropological Science*, 115(1):1–7. [48](#), [50](#), [51](#), [53](#), [55](#), [57](#), [58](#)
- RASCHKA, C. et SCHMIDT, K. (2013). Sports anthropological and somatotypical comparison between higher class male and female badminton and tennis players. *Papers on Anthropology XXII*, 22:153–161. [49](#), [50](#), [53](#), [55](#), [57](#), [58](#)
- REILLY, T. (1990). The racket sports. In REILLY, T., SECHER, N., SNELL, P. et WILLIAMS, C., éditeurs : *Physiology of Sports*, pages 337–370. E and FN Spon/Chapman and Hall, London, England. [47](#)
- REVAN, S., AYDOGMUS, M., BALCI, S. S., PEPE, H. et EROGLU, H. (2007). The evaluation of some physical and physiological characteristics of Turkish and foreign national badminton team players. *Niğde Üniversitesi Beden Eğitimi ve Spor Bilimleri Dergisi*, 1(2):63–70. [48](#), [50](#), [51](#), [53](#), [55](#), [57](#), [58](#)
- SALAMONE, J. D., CORREA, M., FARRAR, A. et MINGOTE, S. M. (2007). Effort-related functions of nucleus accumbens dopamine and associated forebrain circuits. *Psychopharmacology (Berl)*, 191:461–482. [79](#)
- SGHERZA, A. L., AXEN, K., FAIN, R., HOFFMAN, R. S., DUNBAR, C. C. et HAAS, F. (2002). Effect of naloxone on perceived exertion and exercise capacity during maximal cycle ergometry. *Journal of Applied Physiology*, 93:2023–2028. [79](#)
- SHELDON, W. H., STEVENS, S. S. et TUCKER, W. B. (1940). *The varieties of human physique : an introduction to constitutional psychology*. New York, hafner pub édition. [53](#)
- SINGH, B. B. et SINGH, J. (2011). A comparative study on somatotypes of north zone badminton and tennis players variorum, multi-disciplinary. *Variorum , Multi-Disciplinary e-Research Journal*, 2(1):1–8. [50](#), [53](#), [55](#), [58](#)
- SMITH, J. et CHANG, C. (1999). Heart rate and blood lactate responses during training and competition in elite badmitnon players. *Medicine and Sciences in Sports Exercice*, 31(5):1463. [59](#)

- SOKOLOWSKA, E., KRAKOWIAK, H., CABRIC, M. et KRAKOWIAK-SARNOWSKA, E. (2005). Body constitution and body composition of gymnasium pupils attending sports classes and their non-training peers. *Polish Journal of Sports Medicine*, 21(2): 123–127. [47](#)
- SOVAK, D. et HAWES, M. R. (1987). Anthropological status of international caliber speed skaters. *Journal of Sport Sciences*, 5(3):287–304. [47](#)
- STEININGER, K. et WODICK, R. E. (1987). Sports-specific fitness testing in squash. *British Journal of Sports Medicine*, 21(2):23–26. [60](#)
- SUBRAMANIAN, A. (2013). Investigation of the factors predominant to badminton playing ability. *Academic Sports Scholar*, 2(8):1–6. [47](#)
- SUNDARAJAN, G. S., PANDE, P. K. et SALAUDEEN, M. B. A. (1982). Correlation of certain physical measurements with performance in archery. *In Congress of Sports Sciences*. [47](#)
- TANNER, J. M. et WHITEHOUSE, R. H. (1955). The harpenden skinfold caliper. *American Journal of Physical Anthropology*, 13(4):743–746. [50](#), [52](#)
- TERVO, T., NORDSTRÖM, P. et NORDSTRÖM, A. (2010). Effects of badminton and ice hockey on bone mass in young males : a 12-year follow-up. *Bone*, 47(3):666–72. [47](#)
- van LIESHOUT, K. A. et LOMBARD, A. J. J. (2003). Physiological profile of elite junior badminton players in South Africa. *African Journal Physical, Health Education, Recreation and Dance*, pages 114–120. [48](#), [49](#), [50](#), [53](#)
- WAN NUDRI, W. D., ISMAIL, M. N. et ZAWIAK, H. (1996). Anthropometric measurements and body composition of selected national athletes. *Malaysian Journal of Nutrition*, 2:138–147. [48](#), [50](#), [57](#)
- WERKIANI, M. E., ZAKIZADEH, B., FEIZABADI, M. S., GOLSEFIDI, F. N. et RAHIMI, M. (2012). Review of the effective talent identification factors of badminton for better teaching to success. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 31(2011):834–836. [47](#)
- WITHERS, R. T., CRAIG, N. P., BOURDON, P. C. et NORTON, K. I. (1987). Relative body fat and anthropometric prediction of body density of male athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 56(2):191–200. [48](#), [49](#), [50](#)

- WONISCH, M., HOFMANN, P., SCHWABERGER, G., von DUVILLARD, S. P. et KLEIN, W. (2003). Validation of a field test for the non-invasive determination of badminton specific aerobic performance. *British Journal of Sports Medicine*, 37(2):115–118. 59
- WRIGHT, R. A. (2008a). Mental fatigue influence on effort-related cardiovascular response : Extension across the regulatory (inhibitory)/non-regulatory performance dimension. *International Journal of PsychoPhysiology*, 69(2):127–133. 79
- WRIGHT, R. A. (2008b). Refining the prediction of effort : Brehm’s distinction between potential motivation and motivation intensity. *Social and Personality Psychology Compass*, 2:682–701. 79
- WRIGHT, R. A., JUNIOUS, T. R., NEAL, C., AVELLO, A., GRAHAM, C., HERRMANN, L., JUNIOUS, S. et WALTON, N. (2007). Mental fatigue influence on effort-related cardiovascular response : difficulty effects and extension across cognitive performance domains. *Motivation and Emotion*, 31(3):219–231. 79





## Conclusion

Nous avons étudié au cours de cette partie l’importance des outils expérimentaux dans la captation de la vitesse du projectile lors d’un smash en badminton. La vitesse obtenue avec la centrale inertielle offre des vitesses proches de la réalité, cependant des limites importantes comme la difficulté, l’absence ou la limite d’enregistrement ne permettent pas de fournir des indications fiables. Le radar quant à lui, nécessite un certain apprentissage et des pertes importantes compensés par l’absence de limitation de vitesse. Afin de répondre aux grandes vitesses de frappe des joueurs, nous avons privilégié l’utilisation du radar pour les futures expérimentations.

La mise en place d’un test terrain permettant de catégoriser les joueurs de badminton a mis en avant des adaptations des joueurs afin de maintenir la performance. Le test est proche des conditions de terrain et permet de rendre compte de la fatigue liée à la répétition des échanges et de l’intermittence au cours d’un match. Il permet aux entraîneurs d’avoir une première approche des besoins de ses joueurs et de leurs évolutions.

En conclusion, le radar sera utilisé pour des expérimentations ultérieures. Cependant les valeurs de la centrale inertielle peuvent aussi fournir des informations importantes pour les joueurs et les entraîneurs. De plus, le test MRSAB, permet de prendre en compte plusieurs facteurs de performance proche des conditions écologiques. Cependant il est important de souligner que cela ne reflète pas les conditions réelles du terrain par l’adversité et l’incertitude. Ces tests sont avant tout un indicateur de performance afin d’observer le niveau de base, les besoins et la progression des joueurs.



## Deuxième partie

Déterminant des demandes  
physiologiques, neuromusculaires et  
psychologiques dans le maintien de  
la performance



---

## Introduction

Dans la partie précédente, nous avons validé des outils expérimentaux permettant l'analyse de la vitesse de frappe des joueurs et des demandes neuromusculaires et physiologiques des joueurs. Au cours de cette partie, nous nous concentrerons spécifiquement sur les adaptations dont le maintien de la performance chez les joueurs experts et élites durant un match prolongé de badminton. Le test a permis d'observer l'impact de la filière anaérobie sur la performance sportive. Cependant, ne prenant pas en compte les incertitudes et l'adversité, il est difficile de caractériser la fatigue. Ainsi, plusieurs questions ont émergé de cette réflexion, nous amenant à nous demander comment les joueurs sont capables de maintenir un haut niveau d'intensité. Quels sont les moyens mis en place par les joueurs pour maintenir la performance ? Quelles sont les adaptations physiologiques, neuromusculaires et psychologiques ? La fatigue modifie-t-elle les stratégies et les tactiques des joueurs ?

Nous verrons au cours de cette partie, l'évolution physiologique, neuromusculaire et psychologique des joueurs de badminton durant un match prolongé (1 heure). Nous étendrons notre discussion à travers l'observation de variables temporelles et de variables notationnelles, afin de comprendre l'impact que peut avoir l'adaptation l'organisme sur le match.



# Chapitre 3

## “Caractérisation” de la fatigue sur la performance lors d’un match prolongé

■ *J’aime bien être fatigué, ça me repose* ■

---

Pascal Garnier

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Les analyseurs temporels et notationnels de la performance</b>	<b>107</b>
3.1.1	Quels sont les analyseurs temporels ? . . . . .	107
3.1.2	Le temps de jeu en badminton : évolution de la place des frappes . . . . .	108
<b>3.2</b>	<b>La physiologie d’un match de badminton : état des connaissances</b>	<b>113</b>
3.2.1	Quelle(s) filière(s) est/sont utilisée(s) ou prédomine(nt) en badminton ? . . . . .	115
3.2.2	Évolution de la fréquence cardiaque durant un match . . . . .	116
3.2.3	Le lactate sanguin . . . . .	117
3.2.4	Déshydratation chez les joueurs de badminton . . . . .	118
<b>3.3</b>	<b>Analyse de la fatigue durant un match de badminton</b>	<b>120</b>
3.3.1	Objectif . . . . .	120
3.3.2	Protocole expérimental . . . . .	121

CHAPITRE 3. “CARACTÉRISATION” DE LA FATIGUE SUR LA  
PERFORMANCE LORS D’UN MATCH PROLONGÉ

---

3.3.3	Résultats . . . . .	126
3.3.4	Discussion . . . . .	129
3.3.5	Évolution des caractéristiques temporelles du match . . . . .	135
<b>3.4</b>	<b>Références . . . . .</b>	<b>139</b>

---

*Ce travail a été réalisé avec la collaboration de Stéphane Ibrahime et d’Anne-Marie Heugas*





## 3.1 Les analyseurs temporels et notationnels de la performance

Le badminton est caractérisé comme une activité de raquette composée d’actions très intenses et de courtes durées couplées à un court temps de récupération [Cabello Manrique et González-Badillo, 2003]. Un match de badminton se déroule en deux sets gagnants de 21 points chacun avec deux points d’écart allant jusqu’à 30 points. Les modifications du système de comptage des points au cours de son histoire a amené le jeu à devenir de plus en plus rapide [Laffaye *et al.*, 2015].

### 3.1.1 Quels sont les analyseurs temporels ?

Les différentes études qui se sont intéressées au badminton ont montré que les matchs durent en moyenne de 40 minutes à une heure [Abián *et al.*, 2011, 2012; Cabello *et al.*, 2004; Cabello Manrique et González-Badillo, 2003; Chen et Chen, 2008; Chin *et al.*, 1995]. Cependant, la durée d’un match n’est pas le seul indicateur révélant de la gestion temporelle des joueurs dans le maintien de la performance. Pour être plus précis dans leurs analyses, les études scientifiques ont fait émerger des variables permettant une analyse minutieuse du match [Abián *et al.*, 2014; Abian-Vicen *et al.*, 2013; Cabello *et al.*, 2004; Cabello Manrique et González-Badillo, 2003; Chen et Chen, 2008; Chen et Chang, 2011; Faude *et al.*, 2007; Ming *et al.*, 2008]. Les indicateurs sont :

- la **Durée de l’échange (DE)** correspondant au temps de jeu dès l’impact du volant au service jusqu’à la fin de l’échange ;
- la **Durée du temps de repos (DR)** correspondant au temps où le volant n’est plus en jeu jusqu’à sa remise en jeu ;
- le **Temps de jeu effectif (TJE)** correspondant à la somme de la durée des échanges au cours du match divisé par le temps total du match et multiplié par 100 ;
- le nombre de **Frappes par échange (F/E)** comprenant le nombre de fois où le volant est frappé par les joueurs du service jusqu’à la fin de l’échange ;
- le “**Work density (WD)**” (révélateur de la pratique du joueur) calculé à partir du nombre de **F/E** divisée par la **DR** et multiplié par 100 ;
- la **Fréquence des échanges (FE)** (indicateur de la vitesse des échanges) calculé à

partir du nombre de F/E divisée par la DE.

En badminton, les différentes disciplines (le Simple Homme (SH), le Simple Dame (SD), le Double Homme (DH), le Double Dame (DD) et le Mixte (Mx)) ont des spécificités propres à chacune. Au cours de ce chapitre, nous nous intéresserons au SH sur lequel les écrits scientifiques sont les plus nombreux avec la littérature. Plusieurs auteurs soulignent l’importance des différences entre le SH et le SD, mettant en avant des valeurs significativement supérieures en SH ( $p < 0.05$ ) [Abian-vicen *et al.*, 2013; Cabello *et al.*, 2004]. Pour réaliser ce tableau, nous avons moyenné l’ensemble des travaux scientifiques traitant les différentes variables afin d’avoir une tendance la plus proche de la réalité. Les paramètres de performance dans cette discipline sont supérieurs à ceux du SD comme nous le montre le tableau 3.1.

Variables	SH	SD
Durée du match (s)	1885.1	1365.1
Durée des échanges (s)	7.7	6.1
Durée de repos (s)	15.4	14.0
TJE (%)	32.1	29.8
Nombre de coups par échange	6.8	5.4
WD	0.49	0.43
FE ( $s^{-1}$ )	1.02	0.89

TABLEAU 3.1 – Moyenne des différentes études analysants les variables temporelles

### 3.1.2 Le temps de jeu en badminton : évolution de la place des frappes

L’impact de l’évolution du système de comptage de point, passant de 15 points pour les hommes et 11 points pour les femmes à 21 points pour les deux disciplines, a amené une diminution significative du temps total moyen du match en simple ( $p < 0.05$ ) et une augmentation significative de la FE ( $p < 0.05$ ) [Abián *et al.*, 2014; Abian-Vicen *et al.*, 2013; Cabello *et al.*, 2004; Cabello Manrique et González-Badillo, 2003; Chen et Chen, 2008; Chen et Chang, 2011; Faude *et al.*, 2007; Ming *et al.*, 2008]. Le règlement permettant de remporter le point sans obtention du service (tie-break), a contribué à la diminution du temps de jeu. Le jeu devenant plus offensif, la FE a alors augmenté avec la vitesse des frappes.

L’augmentation de la FE est expliquée par deux phénomènes :

- l’augmentation de la vitesse de frappe qui accroît la vitesse du volant ;
- les choix de frappes offensifs.

L’utilisation de la vidéo a permis de se rendre compte de cette évolution. Elle est aussi devenu un outil permettant aux entraîneurs de visualiser, d’analyser et d’anticiper les stratégies adverses. Ainsi, avant un match, les choix tactiques adaptés au joueur seront pris qu’il remporte la rencontre.

### 3.1.2.1 Présentation des différentes frappes

Une analyse notationnelle passe par l’analyse des différentes frappes. Cette observation fournit des informations objectives des performances individuelles du joueur et de l’adversaire. Les frappes en badminton sont diverses et variées mais peuvent être regroupées en plusieurs catégories. L’ensemble des frappes est défini comme suit :

- le smash est une frappe agressive avec une trajectoire descendante frappé au-dessus de la tête, dont l’objectif est de remporter le point ou de déstabiliser l’adversaire ;
- le dégagement est composé de deux types de frappes :
  - a) le dégagement offensif avec une trajectoire tendue dont l’objectif est de déborder l’adversaire sur la ligne du fond de terrain ;
  - b) le dégagement défensif avec une trajectoire en tartaglia en direction du fond de terrain adverse afin de conserver l’échange en se redonnant du temps pour se replacer ;
- l’amorti est un coup offensif avec une trajectoire descendante vers l’avant du terrain dont l’objectif est d’amener le joueur au filet. Pour simplifier, nous avons rassemblé le slice avec l’amorti ;
- le lob est une frappe où le volant est joué au filet et est envoyé à l’arrière du terrain de l’adversaire avec une trajectoire tendue, c’est avant tout un coup offensif. On peut aussi le coupler avec le “lift” qui est une frappe défensive mais avec une trajectoire en tartaglia dont l’objectif est de regagner du temps dans une situation de crise ;

CHAPITRE 3. “CARACTÉRISATION” DE LA FATIGUE SUR LA  
PERFORMANCE LORS D’UN MATCH PROLONGÉ

- le contre-amorti est une frappe précise près du filet. Le “spin” ont été compris avec le contre-amorti dans notre étude ;
- l’attaque au filet est une frappe agressive au filet avec une trajectoire descendante ayant pour but de prendre le volant le plus vite possible dès que celui-ci a franchi le filet. Elle est avant tout utilisée pour conclure les échanges ;
- le drive est une frappe puissante visant le milieu de la taille du joueur et se jouant au milieu du terrain avec une trajectoire tendue, souvent utilisé en double.

Étude	Participant ( <i>n</i> )	Dégage- ment	Smash	Amorti	Drive	Lob / lift	Contre- amorti
Masculin							
Lee <i>et al.</i> [2005]	International (40) <sup>1</sup>	12.1 (NS)	14.2 (NS)	13.2 (NS)	NS (NS)	19.6 (NS)	20.7 (NS)
Ming <i>et al.</i> [2008]	National Ju- nior (16) <sup>1</sup>	14 (NS)	14 (NS)	13 (NS)	NS (NS)	23 (NS)	17 (NS)
Abian- viken <i>et al.</i> [2013]	JO (20) <sup>2</sup>	NS (NS)	29.1 (8.4)	3.8 (3.5)	6.3 (3.9)	NS (NS)	NS (NS)
Abián <i>et al.</i> [2014]	JO 2008 (20) <sup>2</sup>	NS (NS)	29.1 (8.4)	NS (NS)	NS (NS)	2.3 (1.7)	16.0 (6.6)
Abián <i>et al.</i> [2014]	JO 2012 (20) <sup>2</sup>	NS (NS)	27.8 (8.1)	NS (NS)	NS (NS)	3.9 (4.3)	13.3 (5.4)
Tong et Hong [2000]	International (11) <sup>2</sup>	13 (NS)	14 (NS)	16 (NS)	15 (NS)	12 (NS)	17 (NS)
Ming <i>et al.</i> [2008]	National Ju- nior (16) <sup>2</sup>	16 (NS)	13 (NS)	13 (NS)	NS (NS)	22 (NS)	17 (NS)
Féminin							
Lee <i>et al.</i> [2005]	International (40) <sup>1</sup>	23.3 (NS)	8.4 (NS)	19.9 (NS)	NS (NS)	20.2 (NS)	16.6(NS)
Ming <i>et al.</i> [2008]	National Ju- nior (16) <sup>1</sup>	23 (NS)	10 (NS)	17 (NS)	NS (NS)	15 (NS)	15 (NS)

Étude	Participant ( <i>n</i> )	Dégage- ment	Smash	Amorti	Drive	Lob / lift	Contre- amorti
Abian- vicen <i>et al.</i> [2013]	JO (20) <sup>2</sup>	NS (NS)	21.6 (9.5)	9.0 (6.0)	2.0 (2.7)	NS (NS)	NS (NS)
Ming <i>et al.</i> [2008]	National Ju- nior (16) <sup>2</sup>	23 (NS)	8 (NS)	22 (NS)	NS (NS)	14 (NS)	14 (NS)

Note : moyenne (écart-type) ; NS : non spécifié

<sup>1</sup> : en 15 points ; <sup>2</sup> : en 21 points

TABLEAU 3.2 – Distribution des différentes frappes durant un match de badminton

Oswald [2006] a montré une plus grande distribution des frappes offensives que défensives. Les joueurs préfèrent utiliser le service court, avec une trajectoire tendue plutôt qu’un service long avec une trajectoire en tartaglia, afin d’obtenir une situation offensive dès le retour de service. Puisque le règlement permet aux joueurs de remporter le point avec obtention ou non du service (tie-break), ceux-ci commencent à fortement privilégier le smash. Celui-ci devient chez les hommes l’un des coups les plus utilisés pour mettre en difficulté ou conclure les échanges à environ 29.1 (8.4) %. Chez les dames, l’amorti est privilégiée à environ 9.0 (6.0) % (tableau 3.2). Il est important de souligner qu’il n’y a pas de différence significative dans l’utilisation des autres frappes ( $p > 0.05$ ).

De plus, le SH sollicite des frappes régulières au filet (lob = 19 % et contre-amorti = 18 %), à l’inverse du SD qui se joue davantage sur le fond du terrain (dégagement = 23 % et amorti = 17 %). Pour affiner l’analyse, le gain du point a aussi été observé afin de se rendre compte de l’impact de la tactique adoptée par les joueurs (tableau 3.3). Les études ont détaillé en 3 parties :

- la Faute Provoquée (FP) est la situation où le point est remporté en mettant en difficulté l’adversaire l’amenant à retourner le volant dans une situation défavorable, en dehors du terrain et/ou dans le filet ;
- la Faute Directe (FD) est la situation où le gain du point est obtenu sans qu’il n’y ait eu de pression temporelle adverse ;

— le **Point Direct (PD)** est obtenu lorsque le joueur termine l’échange sans que l’adversaire ne puisse toucher le volant.

Etude	Participant ( $n$ )	FP	FD	PD
Tong et Hong [2000]	International (11) <sup>1 R</sup>	9.3 (3.6)	21.2 (10.3)	22.7 (7.8)
Chen <i>et al.</i> [2011]	International (10) <sup>1 S</sup>	50.0 (NS)	13.0 (NS)	36.0 (NS)
Chen <i>et al.</i> [2011]	International (10) <sup>1 S</sup>	62.0 (NS)	15.0 (NS)	22.0 (NS)
Scoring actuel				
Abian-vicen <i>et al.</i> [2013]	JO (10) <sup>2 R</sup> / Masculin	NS (NS)	41.0 (9.4)	NS (NS)
Abian-vicen <i>et al.</i> [2013]	JO (10) <sup>2 R</sup> / Féminin	NS (NS)	48.6 (9.0)	NS (NS)
Abián <i>et al.</i> [2014]	JO 2008 (20) <sup>2 R</sup>	NS (NS)	41.0 (9.5)	NS (NS)
Abián <i>et al.</i> [2014]	JO 2012 (20) <sup>2 R</sup>	NS (NS)	42.6 (8.9)	NS (NS)
Chen <i>et al.</i> [2011]	International (5) <sup>2 S</sup> / Vainqueur	55.0 (NS)	10.0 (NS)	33.0 (NS)
Chen <i>et al.</i> [2011]	International (5) <sup>2 S</sup> / Perdant	68.0 (NS)	11.0 (NS)	20.0 (NS)

Note : moyenne (écart-type) ; NS : non spécifié

<sup>1</sup> : en 15 points ; <sup>2</sup> : en 21 points

Condition réelle : <sup>R</sup> ; condition simulée : <sup>S</sup>

TABLEAU 3.3 – Résultat comparatif dans l’obtention du gain de l’échange au cours d’un match de badminton

L’évolution du règlement a amené une augmentation de la vitesse et de l’intensité de jeu, afin de le rendre plus attractif, mais cela n’a pas modifié la manière dont les joueurs remportent les échanges [Laffaye *et al.*, 2015]. Cependant de manière générale, le joueur réalisant le moins de fautes directes a tendance à remporter plus fréquemment le match ( $p > 0.05$ ). Cela résulte d’un effet d’expertise montrant une capacité à conserver le volant durant l’échange dans des situations favorables mais aussi défavorables.

## 3.2 La physiologie d’un match de badminton : état des connaissances

La littérature scientifique a montré que le badminton tend à aller plus vite, et que les joueurs dépensent énormément d’énergie à conserver ou à créer la rupture des échanges. Comme le soulignent [Cabello \*et al.\* \[2004\]](#) et [Raman et Nageswaran \[2013\]](#), le badminton est une activité sportive exigeante en besoin énergétique. En effet, il est considéré comme l’un des sports de raquette les plus épuisants au monde avec le squash [[Liddle \*et al.\*, 1996](#)]. Dans leur étude, [Raman et Nageswaran \[2013\]](#) soulignent des caractéristiques spécifiques comme la vitesse élevée, la vivacité importante, la flexibilité à se mouvoir, l’endurance et la grande force des membres supérieurs et inférieurs.

Les dépenses énergétiques proviennent souvent des déplacements rapides des joueurs pour frapper les volants, ainsi que les changements de directions dûs aux différents mouvements durant les échanges [[Raman et Nageswaran, 2013](#); [Tiwari \*et al.\*, 2011](#); [van Lieshout et Lombard, 2003](#)]. La discipline influence la sollicitation d’énergie et le simple sollicite davantage d’énergie que le double [[Liddle \*et al.\*, 1996](#)], avec environ 80 % des échanges inférieurs à  $\approx 10$  secondes [[Abian-vicen \*et al.\*, 2013](#); [Cabello \*et al.\*, 2004](#); [Cabello Manrique et González-Badillo, 2003](#); [Faude \*et al.\*, 2007](#); [Lees, 2003](#); [Liddle \*et al.\*, 1996](#)].

Étude	Participant ( <i>n</i> )	Lactate ( <i>mmol/L</i> )	VO <sub>2</sub> ( <i>mL/kg/min</i> )	HR ( <i>batt/min</i> )	HR <sub>max</sub> ( <i>batt/min</i> )
Masculin					
<a href="#">Cabello Manrique et González-Badillo [2003]</a>	Elite (11) <sup>c</sup>	3.8 (0.9)	NS (NS)	173.4 (8.9)	190.6 (5.5)
<a href="#">Cabello <i>et al.</i> [2004]</a>	Elite (41) <sup>c</sup>	3.9 (2.2)	NS (NS)	172.0 (10.0)	191.0 (9.0)
<a href="#">Faude <i>et al.</i> [2007]</a>	Elite (4) <sup>e</sup>	1.9 (0.1)	46.0 (4.5)	166.0 (6.0)	NS (NS)

CHAPITRE 3. “CARACTÉRISATION” DE LA FATIGUE SUR LA  
PERFORMANCE LORS D’UN MATCH PROLONGÉ

Étude	Participant ( <i>n</i> )	Lactate ( <i>mmol/L</i> )	VO <sub>2</sub> ( <i>mL/kg/min</i> )	HR ( <i>batt/min</i> )	HR <sub>max</sub> ( <i>batt/min</i> )
Docherty [1982]	Elite (42) <sup>e</sup>	NS (NS)	NS (NS)	NS (NS)	175.0 (6.0)
Liddle <i>et al.</i> [1996]	Elite (10) <sup>e</sup>	NS (NS)	NS (NS)	NS (NS)	192.6 (7.5)
Chen <i>et al.</i> [2013]	Elite (14) <sup>e</sup>	NS (NS)	52.4 (4.1)	NS (NS)	186.0 (5.4)
Chin <i>et al.</i> [1995]	Elite (12) <sup>tp</sup>	10.4 (2.9)	NS (NS)	NS (NS)	187.0 (8.0)
Andersen <i>et al.</i> [2007]	Elite (35) <sup>tp</sup>	NS (NS)	63.0 (0.8)	NS (NS)	188.0 (1.0)
Heller [2010]	Elite (54) <sup>tp</sup>	10.6 (2.4)	63.2 (3.7)	NS (NS)	186.6 (9.2)
Ooi <i>et Sidek</i> [2010]	Elite (12) <sup>tp</sup>	NS (NS)	56.9 (3.7)	NS (NS)	NS (NS)
Wonisch <i>et al.</i> [2003]	Elite (17) <sup>tp</sup>	7.6 (2.1)	NS (NS)	NS (NS)	195.0 (6.0)
Chen <i>et al.</i> [2011]	Expert (11) <sup>e</sup>	4.6 (0.4)	NS (NS)	178.9 (1.8)	NS (NS)
Ghosh [2008]	Expert (8) <sup>e</sup>	12.2 (2.1)	57.4 (7.0)	NS (NS)	197.0 (6.7)
Majumdar <i>et al.</i> [1997]	Expert (6) <sup>e</sup>	4.7 (1.9)	55.7 (4.4)	157.0 (11.0)	183.0 (9.0)
Bottoms <i>et al.</i> [2013]	Expert (9) <sup>tp</sup>	NS (NS)	52.1 (10.9)	NS (NS)	200.0 (11.0)
Lin <i>et al.</i> [2007]	Expert (11) <sup>tp</sup>	NS (NS)	51.0 (6.0)	NS (NS)	196.0 (5.0)
Ooi <i>et Sidek</i> [2010]	Expert (12) <sup>tp</sup>	NS (NS)	59.5 (5.2)	NS (NS)	NS (NS)
Gowitzke <i>et</i> Waddell [1979]	Junior (11) <sup>tp</sup>	9.5 (NS)	56.3 (NS)	NS (NS)	202.4 (NS)
Heller [2010]	Junior (50) <sup>tp</sup>	12.0 (1.7)	64.6 (0.4)	NS (NS)	194.9 (7.7)
Féminin					

Étude	Participant ( <i>n</i> )	Lactate ( <i>mmol/L</i> )	VO <sub>2</sub> ( <i>mL/kg/min</i> )	HR ( <i>batt/min</i> )	HR <sub>max</sub> ( <i>batt/min</i> )
Cabello <i>et al.</i> [2004]	Elite (38) <sup>c</sup>	2.4 (1.0)	NS (NS)	176.0 (10.0)	193.0 (9.0)
Faude <i>et al.</i> [2007]	Elite (8) <sup>e</sup>	1.9 (0.9)	36.4 (2.8)	170.0 (10.0)	NS (NS)
Ooi <i>et al.</i> [2009]	Elite (1) <sup>e</sup>	5.8 (NS)	NS (NS)	172 (NS)	NS (NS)
Heller [2010]	Elite (8) <sup>tp</sup>	11.5 (2.0)	55.2 (2.6)	NS (NS)	193.8 (7.9)
Gowitzke <i>et</i> Waddell [1979]	Junior (6) <sup>tp</sup>	9.0 (NS)	47.3 (NS)	NS (NS)	201.3 (NS)
Heller [2010]	Junior (8) <sup>tp</sup>	11.7 (1.6)	54.9 (2.5)	NS (NS)	203.7 (7.8)

Note : NS : non spécifié

<sup>c</sup> : compétition ; <sup>e</sup> : entraînement ; <sup>tp</sup> : tests physiques

HR : rythme cardiaque ; HR<sub>max</sub> : rythme cardiaque maximale ; VO<sub>2</sub> : consommation d’oxygène

TABLEAU 3.4 – Tableau récapitulatif des demandes physiologiques en badminton

Des études antérieures se sont concentrées sur le déficit en oxygène, le rythme cardiaque, le lactate sanguin, et les demandes physiologiques durant des matchs en compétition, à l’entraînement et durant des tests de performance [Abe *et al.*, 1990; Abe et Okamoto, 1989; Araragi *et al.*, 1999; Cabello *et al.*, 2004; Cabello Manrique et González-Badillo, 2003; Chen *et al.*, 2013; Dias et Ghosh, 1995; Faccini et Dal Monte, 1996; Faude *et al.*, 2007; Hughes et Fullerton, 1995; Ki *et al.*, 2002]. Le tableau 3.4 récapitule les demandes physiologiques des joueurs masculins et féminins de badminton indépendamment du niveau et des conditions expérimentales.

### 3.2.1 Quelle(s) filière(s) est/sont utilisée(s) ou prédomine(nt) en badminton ?

Au cours d’un match, les échanges sont composés de temps courts à hautes intensités ( $\approx 7.7$  s), mettant en avant le système anaérobie [Jeyaraman *et al.*, 2012] ou des temps moyens et longs à hautes intensités, mettant en avant le système aérobie [Liddle *et al.*, 1996; Majumdar *et al.*, 1997]. La littérature scientifique souligne une prédominance de

la filière aérobie à  $\approx 60$  à  $70\%$  à l’issue du match, et l’utilisation de la filière anaérobie à  $\approx 30\%$  [Chin *et al.*, 1995; Faccini et Dal Monte, 1996; van Lieshout et Lombard, 2003], avec une grande demande du système anaérobie alactique ; et, à un degré moindre, du métabolisme anaérobie lactique [Cabello Manrique et González-Badillo, 2003]. L’étude temporelle montre une grande fréquence et une haute intensité des échanges durant le match, couplées à un rythme cardiaque élevé, qui indiquent le pourcentage élevé de la filière aérobie chez les joueurs de badminton [Cabello *et al.*, 2004; Cabello Manrique et González-Badillo, 2003; Faude *et al.*, 2007; Wonisch *et al.*, 2003].

L’analyse temporelle révèle que les échanges sont séparés par des courts temps de récupération ( $\approx 15.4$  s) permettant au métabolisme anaérobie de resynthétiser de l’énergie [Subramanian, 2013]. La nature intermittente de l’activité avec une grande demande des différentes filières permet aux joueurs de conserver le plus longtemps possible leur performance durant le match. L’importance des temps de récupération entre les échanges est un point crucial dans la conservation de la prouesse sportive [Andersen *et al.*, 2007]. Cependant afin de limiter le temps de récupération, le règlement prône avant tout un jeu continu selon l’appréciation de l’arbitre.

Les besoins énergétiques selon la discipline ne sont pas identiques, les joueurs de simple sollicitent davantage leur système métabolique énergétique que les joueurs de double. Cela implique une capacité aérobie plus importante dans la production d’énergie en simple afin de faciliter la récupération provenant d’un exercice anaérobie [Liddle *et al.*, 1996]. Des exercices spécifiques sont nécessaires afin d’améliorer le développement aérobie et anaérobie [Gowitzke *et al.*, 1990; Heller, 2010; Raman et Nageswaran, 2013; Wonisch *et al.*, 2003].

### 3.2.2 Évolution de la fréquence cardiaque durant un match

Le rythme cardiaque est un des indicateurs de la performance et de la difficulté d’une activité. L’augmentation de la **Fréquence Cardiaque (FC)** est due à la demande importante en oxygène des muscles [Cabello Manrique et González-Badillo, 2003]. Plus l’effort devient important, plus la FC augmente jusqu’à la FC maximale, propre à chaque individu [Cabello Manrique et González-Badillo, 2003]. Le badminton est une activité contraignante, obligeant les joueurs à réaliser des efforts intenses et de courtes

durées (efforts intermittents). Pour observer le rythme cardiaque moyen et maximal au cours d’un match, les études placent un cardiofréquencemètre [Andersen *et al.*, 2007; Cabello *et al.*, 2004; Cabello Manrique et González-Badillo, 2003; Chen et Chang, 2011; Fahimi et Vaezmousavi, 2011; Fuchs *et al.*, 2014; Heller, 2010; Liddle *et al.*, 1996; Lin *et al.*, 2007; Ooi et Sidek, 2010; Pearce, 2002], enregistrant toutes les 5 secondes les battements du cœur [Laukkanen et Virtanen, 1998]. Les résultats des études sont enregistrés et retranscrits sous forme d’électrocardiogramme.

La littérature scientifique nous montre qu’au cours d’un match, le rythme cardiaque moyen est stable et est très proche de la fréquence maximale, représentant un stress considérable pour le système cardio-vasculaire [Majumdar *et al.*, 1997]. La littérature reporte un rythme cardiaque maximal moyen de  $\approx 191.0$  battements/minute chez les hommes et  $\approx 197.6$  battements/min chez les femmes, pour tout niveau confondu. En catégorisant selon le niveau d’expertise, les valeurs moyennes montrent que le rythme cardiaque maximale moyen est de  $\approx 188.0$  battements/min pour les élites,  $\approx 194.0$  battements/min pour les experts,  $\approx 198.7$  battements/min pour les juniors masculins,  $\approx 193.4$  battements/min pour les expertes et  $\approx 202.5$  battements/min pour les juniors féminines [Phomsoupha et Laffaye, 2015].

### 3.2.3 Le lactate sanguin

Le lactate est un indicateur de la difficulté d’un effort et d’une expertise. Plus un athlète est entraîné, plus sa capacité à éliminer le lactate dans un laps de temps sera importante. Cependant, s’il arrive à un seuil de saturation, le lactate peut être l’une des causes de l’arrêt d’un effort et/ou d’une performance. L’acidose musculaire est un facteur pouvant réduire les capacités d’un sportif. Lors d’un effort intense, une augmentation importante et rapide du lactate a lieu. Ceci est le résultat et le témoin du bon fonctionnement de la glycolyse anaérobie lors d’un travail musculaire intense. Un seuil de lactatémie faible met en avant une faible production énergétique.

La concentration de lactate sanguin est analysée au moyen d’un échantillon de sang prélevé, le plus souvent au niveau du lobe de l’oreille ou à partir d’un échantillon capillaire (20  $\mu$ l) [Faude *et al.*, 2007; Fuchs *et al.*, 2014; Ooi et Sidek, 2010], à l’aide de bandes réactives. Elle est immédiatement analysée en utilisant un analyseur sanguin

[Bishop, 2001; Bosquet *et al.*, 1998].

Les études s’intéressant au taux de lactate dans le sang ont montré que durant un match de simple, le lactate sanguin est compris entre 2.9 à 12.2 mmol/L, avec une valeur moyenne environnant les 4.4 mmol/L [Cabello *et al.*, 2004; Cabello Manrique et González-Badillo, 2003; Chen et Chang, 2011; Majumdar *et al.*, 1997; Mikkelsen, 1979]. Cette concentration s’explique par un haut pourcentage de la  $VO_{2max}$  des joueurs et une FC proche du maximum durant le match (tableau 3.4). Ghosh [2008] souligne que l’énergie provient essentiellement du système anaérobie lactique.

Au cours de leurs travaux, Phomsoupha et Laffaye [2015] ont moyenné l’ensemble des études, révélant une concentration de lactate maximale de 7.0 mmol/L pour les hommes et 7.1 mmol/L pour les femmes durant un match. Toutefois, des différences existent entre les joueurs selon l’âge, les aptitudes et le niveau d’entraînement [Cabello Manrique et González-Badillo, 2003]. Cependant, les faibles valeurs obtenues s’expliquent par une grande capacité aérobie liée à l’entraînement des participants [Cabello Manrique et González-Badillo, 2003; Chin *et al.*, 1995; Hughes, 1994], à l’ingestion de carbohydrate pour prévenir la détérioration de la performance [Bottoms *et al.*, 2013], et un meilleur apport d’oxygène par la myoglobine [Hughes, 1994; Majumdar *et al.*, 1997]. Le temps de prélèvement est un biais existant pouvant sous estimer les valeurs du recueil du lactate. De plus, il est plausible que le pic relevé ne reflète pas la production maximale durant le match [Cabello *et al.*, 2004; Faccini et Dal Monte, 1996].

### 3.2.4 Déshydratation chez les joueurs de badminton

Le corps humain est doté d’un système de régulation de la chaleur lui permettant de diminuer la température interne à l’aide de la sudation afin de se refroidir. Le maintien d’une température corporelle joue un rôle important dans le fonctionnement optimal des organes vitaux. La thermorégulation est un phénomène passif permettant aux joueurs de réaliser la meilleure performance possible face à l’augmentation de la chaleur corporelle. Lors d’une activité physique, la dégradation de l’Adénosine Triphosphate (ATP) en énergie musculaire libère  $\approx 75$  % sous forme de chaleur et  $\approx 25$  % est converti en travail.

Durant un match, l’énergie produite lors des actions de frappe génère de la chaleur qui augmente la température corporelle du sportif. Afin de réguler cette augmentation, la sudation réduit la température corporelle mais amène une perte hydrique chez les joueurs. Cette altération est estimée en comparant la différence de masse avant et après le match, divisée par la surface du corps de l’individu. Elle est exprimée en kg/m/h [Abián *et al.*, 2011, 2014; Abián-Vicén *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2013]. Les conditions extérieures déterminent la demande physiologique du joueur. L’équipement (vêtements), les caractéristiques anthropométriques du joueur, le match et la température sont des facteurs de thermorégulation de l’organisme [Chen *et al.*, 2013; Maughan *et al.*, 2005] et l’humidité [Abián-Vicén *et al.*, 2012; Lees, 2003].

L’hydratation et la nutrition durant un match sont des déterminants majeurs sur le résultat de celui-ci [Abián *et al.*, 2011, 2014; Abián-Vicén *et al.*, 2012; Lees, 2003]. En influençant sur les temps de repos entre les échanges, les joueurs ont la possibilité de se réhydrater durant le match et de s’alimenter [Lees, 2003]. La littérature scientifique souligne qu’en moyenne, la perte hydrique liée à la transpiration durant un match est  $\approx 1.11$  L/h [Abián *et al.*, 2011, 2014; Abián-Vicén *et al.*, 2012]. Abián *et al.* [2014] a mesuré la déshydratation au cours d’une compétition. Après le second tour, les joueurs ont perdu 0.47 (1.03) % de leur masse corporelle et après les quarts de finale, une diminution de 0.23 (0.43) %. Cependant, les joueurs qui se sont réhydratés pendant et entre les matchs de la compétition, conservent quant à eux des valeurs de masse corporelle stables au cours du tournoi [Phomsoupha et Laffaye, 2015]. Dans l’étude d’Abián *et al.* [2011], le faible niveau de déshydratation n’affecte en rien la performance des muscles, néanmoins, il peut être préjudiciable tout au long de la compétition [Abián-Vicén *et al.*, 2012].

Variable	Pré-match	Post-match
Nitrites	4.1 mg n/L	49.2 mg n/L
Glycosurie	0.0 mg/dL	8.7 mg/dL
Ketone bodies	4.3 mg/dL	9.4 mg/dL
Érythrocyte	3.3 erythrocytes/uL	14.7 erythrocytes/uL
Leucocyturie	2.6 leukocytes/mL	49.3 leukocytes/mL

TABLEAU 3.5 – Analyse urinaire pré- et post- match

Après le match, les analyses urinaires permettent d’étudier les contraintes physiolo-

giques liées à la performance durant un match. [Abián et al. \[2014\]](#); [Abián-Vicén et al. \[2012\]](#) ont mis en exergue la présence de protéine dans les urines des sportifs (protéinurie), de glycosurie, d'érythrocyte, de leucocyturie (tableau 3.5). Cette présence est liée à la haute intensité des matchs que les joueurs ont subie tout au long de la compétition. Ces anomalies urinaires ont été retrouvées dans d'autres activités physiques et sportives tel que le semi-marathon et le marathon [[Abián-Vicén et al., 2012](#)].

### 3.3 Analyse de la fatigue durant un match de badminton

Au cours de notre recherche scientifique, nous avons pu trouver plusieurs éléments traitant des particularités d'un match de badminton. Les études précédentes analysaient les changements physiologiques pré- et post-match. L'altération de la performance des joueurs pouvaient varier du début à la fin du match, selon leur état de fatigue. [Millet et Lepers \[2004\]](#) définissent la fatigue comme étant une altération des capacités d'un individu, induisant une augmentation du coût (neuromusculaire, métabolique ou psychologique) nécessaire à la réalisation d'une tâche et/ou à l'incapacité de réaliser cette tâche. Elle se caractérise par une diminution de la performance [[Millet et al., 2000](#)]. La fatigue musculaire peut être quantifiée comme étant la réduction de la force maximale d'un groupe musculaire [[Millet et al., 2000](#)]. Il est possible d'observer une fatigue centrale et une fatigue périphérique [[Bainbridge, 1931](#)].

#### 3.3.1 Objectif

Pour rester performant tout au long d'un match, les joueurs ont développé des qualités physiques telles que la vitesse, l'agilité, la flexibilité, la puissance, la capacité à changer de direction, et de l'endurance de force qui sont mises à rude épreuve lors d'un effort prolongé et intermittent [[Heller, 2010](#)]. Au cours de notre revue de littérature, nous avons pu constater l'absence d'étude sur la dégradation de la performance liée à un match de badminton et plus particulièrement pendant le match.

De ce fait, l'objectif de cette étude est d'observer l'évolution des variables physio-

logiques, neuromusculaires et psychologiques durant un match prolongé. Il est possible d’analyser l’impact de la “fatigue” sur les membres inférieurs et supérieurs des joueurs. Une analyse temporelle et notationnelle complètera notre étude et mettra en exergue les modifications tactiques lors du match afin de conserver la performance face à la fatigue. Ainsi, il sera possible de mieux comprendre le développement de la fatigue au cours du temps et du match et les liens entre les caractéristiques de match (temporelle et notationnelle) et les demandes physiologiques, psychologiques et neuromusculaires.

Dans cette partie, nous allons quantifier l’impact de la fatigue durant un match de badminton. La durée du match, plus longue que celle obtenue durant un véritable match va nous permettre d’analyser l’évolution de différentes variables. Nous supposons que la “fatigue” détériorera la performance en diminuant les variables neuromusculaires, réduisant ainsi la vitesse du jeu et des frappes. Afin de maintenir un haut-niveau de performance, les joueurs vont modifier leur tactique durant le match face à l’adversité mais à la fatigue qui s’installe. La durée du match, l’adversité et les contraintes physiologiques, neuromusculaires et psychologiques sont des variables qui vont limiter la performance du joueur au cours du match. Ainsi, nous attendons de voir une diminution de l’ensemble des variables, cependant, nous espérons observer des stratégies adaptatives afin de réduire l’influence de la fatigue au cours du match.

## 3.3.2 Protocole expérimental

### 3.3.2.1 Participants

Pour réaliser cette expérimentation, nous avons demandé à 12 joueurs experts avec une expérience nationale et/ou internationale de participer à cette étude (tableau 3.6). Un test navette a été réalisé afin de déterminer la  $VO_{2max}$  (en moyenne  $\approx 57.4$  (5.3) mL/kg/min) et connaître le rythme cardiaque maximal (en moyenne  $\approx 187.7$  (5.1) batt/min) de chaque participant. Tous les athlètes étaient physiquement en bonne santé et n’ont signalé aucune blessure durant tout le temps de l’étude. Avant de venir participer à l’expérience, les participants se sont abstenus de boire de l’alcool ou de boissons à base de café les dernières 24 heures et ne se sont pas alimentés durant les dernières 2 - 3 heures avant l’expérimentation, afin de réduire au maximum tous les effets pouvant interférer dans l’expérimentation.

Variable	Joueurs
Age (année)	25.3 (3.2)
Taille (cm)	179.1 (4.2)
Masse (kg)	79.7 (12.4)
% de masse grasse	17.1 (6.3)
% de muscle	42.7 (2.1)
Heure de pratique (heure par semaine)	7.1 (3.2)

TABLEAU 3.6 – Anthropométrie des joueurs lors de l’expérience

### 3.3.2.2 Design de l’expérimentation

Toutes les expérimentations ont eu lieu à la même heure de la journée (10 à 12 h), à une température de  $\approx 17.2$  (1.1)°C et avec  $\approx 52.3$  (4.2) % d’humidité) pour enlever toute influence des conditions extérieures et circadienne sur la performance. Avant le début de l’expérimentation, les composantes anthropométriques des participants ont été relevées à l’aide d’une balance à impédance. Elles ont été réalisées suite à un échauffement réglementé, consistant à courir pendant 10 minutes avec des déplacements spécifiques et jouer au badminton pendant 10 minutes.

L’expérimentation était découpée en 8 sessions : 6 sessions de 10 minutes entrecoupées afin de recueillir les données et 2 sessions de 10 minutes après la fin du match. La figure 3.1 récapitule le temps de prélèvement des différentes variables au cours du match prolongé. Les joueurs ont eu des temps faibles de repos entre les sessions puisque celles-ci étaient utilisées pour recueillir les performances.

En complément de cela, les règles de la Fédération Internationale de Badminton (2006) ont été appliquées durant tous les matchs. Il a été demandé aux joueurs de ne pas dépasser un temps de repos de plus de 10 secondes afin d’avoir un jeu continu le plus important possible. De plus, pour les besoins de l’expérimentation, nous avons supprimé les périodes habituelles de pause à 11 points de 60 secondes et à la fin du set de 120 secondes. Lors des confrontations, nous mettions face à face des joueurs de niveau équivalent afin qu’aucun des deux ne “sous/sur-joue”. La régulation hydrique des joueurs a été normée. Les joueurs pouvaient s’hydrater toutes les 20 minutes de 150 mL d’eau pour prévenir tout signe de déshydratation [Popkin *et al.*, 2010].

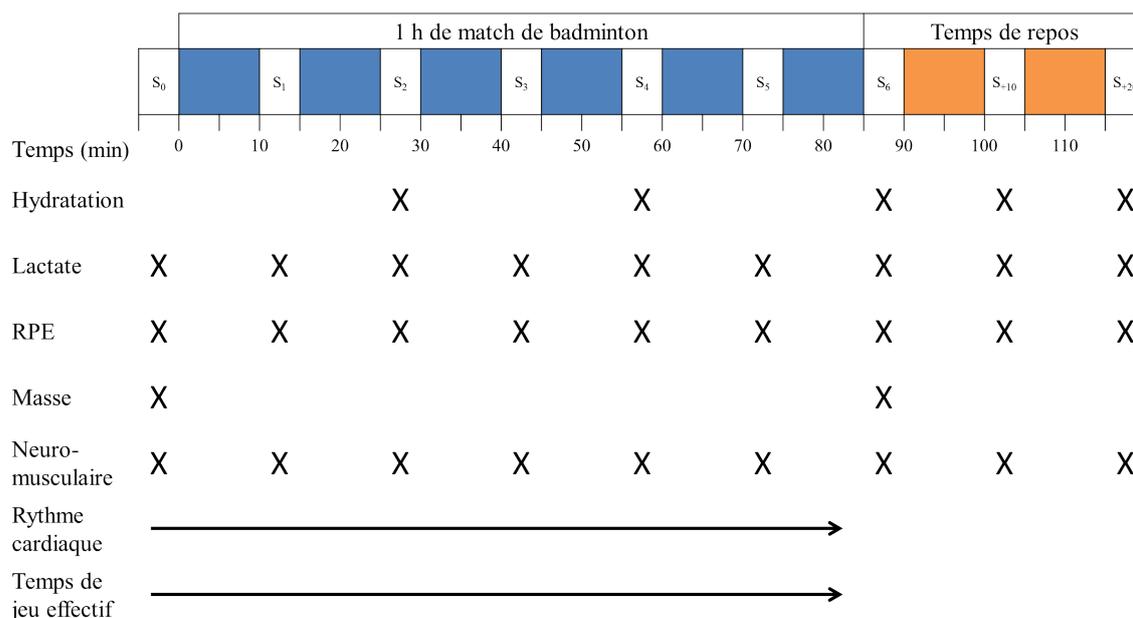


FIGURE 3.1 – Organisation temporelle des différents recueils de données

### 3.3.2.3 Variables physiologiques : le lactate et le rythme cardiaque

Après la phase de préparation, des échantillons sanguins ont été prélevés pour observer l'évolution du lactate sanguin, au début, puis toutes les 10 minutes jusqu'à la fin de l'expérimentation. Pour obtenir cette concentration, le sang est prélevé sur un des doigts de la main non dominante (ne tenant pas la raquette), en utilisant un dispositif portable de prise de lactate (Arkray, Japon). Les participants étaient également équipés durant tout le match d'un cardiofréquencemètre afin d'enregistrer le rythme cardiaque continuellement (RS400 ; Kempele, Finlande).

### 3.3.2.4 Variables neuromusculaires des membres inférieurs et supérieurs

Une phase de familiarisation des différents sauts et de la force de préhension permettant l'analyse neuromusculaire ont été réalisés et dirigés. Trois types de sauts sont réalisés au cours de l'expérimentation, le **Squat Jump (SJ)** (figure 3.2a), le **Contre Mouvement Jump (CMJ)** (figure 3.2b) et le **Saut Rebond (LS)** (figure 3.2c). Les joueurs avaient comme instruction durant le **SJ** de se baisser à 90° de flexion de genou, de placer les mains sur les hanches et de sauter le plus haut possible. La réalisation du **CMJ** est très proche du **SJ**, sauf que pour celui-ci les joueurs n'abordent pas un temps d'arrêt à 90°. Pour le **LS**, les joueurs avaient comme instruction de sauter le plus haut possible avec un temps de contact le plus faible possible au sol.

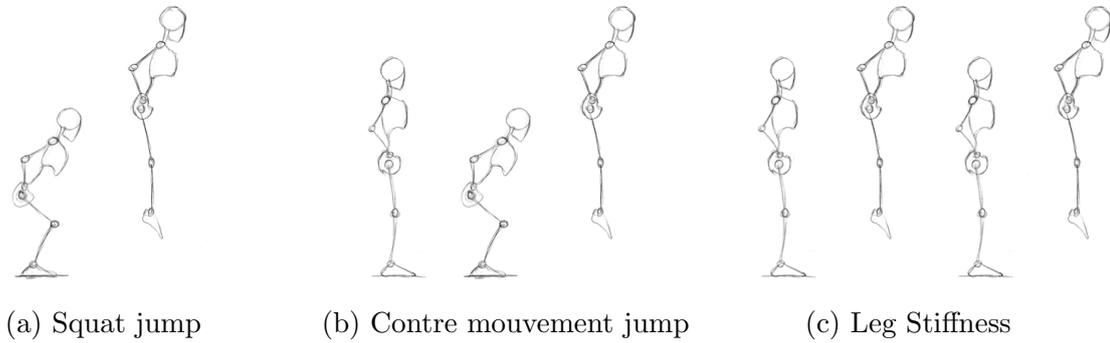


FIGURE 3.2 – Exemple des différents sauts

Toutes les performances ont été enregistrées à l’aide d’un accéléromètre à une fréquence de 500 Hz (Myotest, SA, Suisse) (figure 3.3a). Les différents sauts ont été calculés à partir du temps d’envol comme le préconise Choukou *et al.* [2014]. Le temps passé dans les airs permet de calculer le pic de puissance relatif (W/kg) pour le SJ et le CMJ [Harman *et al.*, 1991]. Pour calculer la raideur, nous avons utilisé comme le préconisent Dalleau *et al.* [2004], la formule suivante :

$$LS = \frac{M * \pi(T_f + T_c)}{T_c^2 \left( \frac{(T_f + T_c)}{\pi} - \frac{T_c}{4} \right)} \quad (3.1)$$

où  $M$  étant la masse totale du sujet,  $T_c$  le temps de contact et  $T_f$  le temps d’envol.

En complément, nous avons procédé au recueil de la force maximale de la force de préhension de la main et des doigts en suivant les recommandations de l’American Society of Hand Therapists. Chaque participant était assis le dos droit, les pieds à plat au sol et les bras en adduction le long du corps. L’angle formé par le coude était de 90° et l’avant-bras était en position neutre. Les joueurs avaient comme instruction de serrer au plus fort le dynamomètre avec la main puis avec les doigts (Camry EH/101, Rosemead, US) et de maintenir pendant 3 secondes (effort isométrique) (figure 3.3b). Les participants devaient conserver leur posture sans modifier l’orientation du coude afin de ne pas compenser la fatigue musculaire. Seul le bras dominant a été enregistré et les meilleures performances sur un maximum de deux essais ont été enregistrées pour analyse.



(a) Myotest permettant l’enregistrement des membres inférieurs (b) Dynamomètre permettant l’enregistrement des membres supérieurs

FIGURE 3.3 – Matériels utilisés pour le recueil des données neuromusculaires

### 3.3.2.5 Analyseurs temporels et notationnels

Les caractéristiques temporelles et notationnelles ont été enregistrées à l’aide d’une caméra vidéo (HDR-XR260VE, Sony, Minato, Japan). L’analyse s’effectuera à posteriori afin d’observer les changements de la durée des échanges, du temps de repos, du TJE et de la FE au cours de chaque session. En complément de cette analyse, la connaissance des différents types de frappes (dégagement, amorti, smash, contre-amorti et lob), la connaissance de la typologie du service et du gain du point (PD, FD et FP) sont des indicateurs de la performance. Ce protocole respecte les recommandations de Laffaye *et al.* [2015].

### 3.3.2.6 Variables psychologiques sur la perception de la fatigue

Au cours de chaque session, les joueurs donnaient leur propre évaluation de leur perception de leur fatigue “centrale” (cardio-vasculaire) et périphérique (membres inférieurs) selon l’échelle proposée par Borg *et al.* [1985]. Cette échelle allant de 6 (très faible) à 20 (exténué) est révélatrice de la perception du joueur sur son état de fatigue.

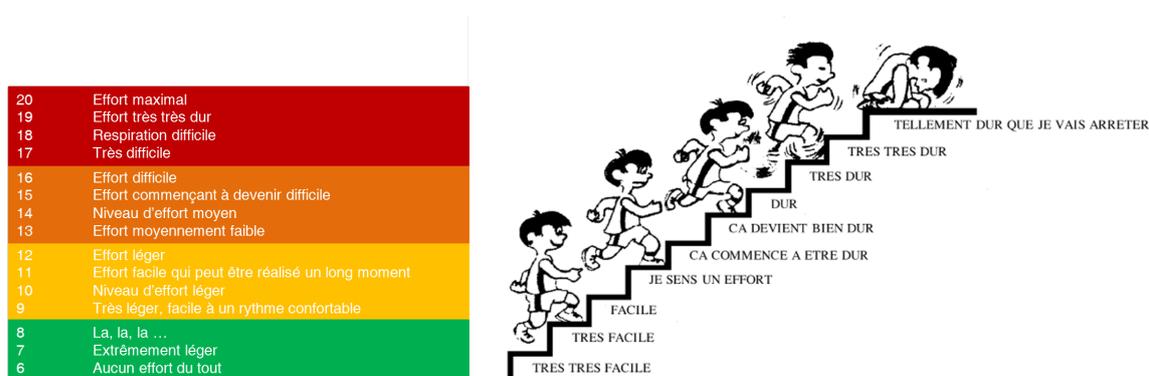


FIGURE 3.4 – Échelle de la perception de l’effort

### 3.3.2.7 Analyse statistique

Pour analyser l’ensemble des résultats, la conception statistique nous a amené à réaliser une **Analyse de la Variance (ANOVA)** à mesure répétée sur les différents analyseurs enregistrés tout le long de l’expérience. Dans le cas où la variance était significative, nous procédions à un test Post Hoc de Fischer’s et à un test de puissance ( $1 - \beta$ ). Le seuil d’acceptabilité était de  $p < 0.05$  et la taille de l’effet ( $\eta^2$ ) défini comme petit pour  $\eta^2 > 0.01$ , moyen pour  $\eta^2 > 0.09$ , ou grand pour  $\eta^2 > 0.25$ . Le coefficient de corrélation Spearman a été calculé pour déterminer les relations entre les différentes variables sélectionnées (Statistica 10 software, StatSoft Inc., Tulsa, US).

### 3.3.3 Résultats

Les résultats de notre étude seront structurés de la manière suivante en mettant en avant les variables physiologiques, les variables neuromusculaires, l’analyse temporelle, l’analyse notationnelle et les variables psychologiques.

#### 3.3.3.1 Variables physiologiques

Au cours du match prolongé, la concentration de lactate dans le sang augmente dès les 10 premières minutes, passant d’une valeur initiale de 1.6 (0.4) à 6.8 (6.3) mmol/l puis reste constante jusqu’à la fin du match 5.8 (5.2) mmol/l (figure 3.5). Le rythme cardiaque mesuré est en moyenne d’environ  $\approx 168$  (13) battements/min, correspondant à environ 85% de la **FC** maximale ( $\%HR_{max}$ ) des participants.

#### 3.3.3.2 Variables neuromusculaires des membres inférieurs et supérieurs

Au cours de chaque enregistrement, la hauteur des différents sauts, **SJ** et **CMJ**, tend à diminuer de -13 % ( $p < 0.001$ ) et de -12 % ( $p < 0.05$ ) respectivement tout au long du match. En comparaison, la hauteur de saut lors du **SJ** est significativement inférieure ( $p < 0.001$ ) à celle du **CMJ** (31.8 cm contre 36.0 cm). Le pic de puissance quant à lui lors du **SJ** diminue significativement ( $p < 0.001$ ), passant de 45.1 à 42.4 W/kg (soit une perte de -5.87 %) et de 48.8 W/kg à 46.1 W/kg lors du **CMJ** (soit une perte de -3.34 %) tout au long du match (figure 3.6).

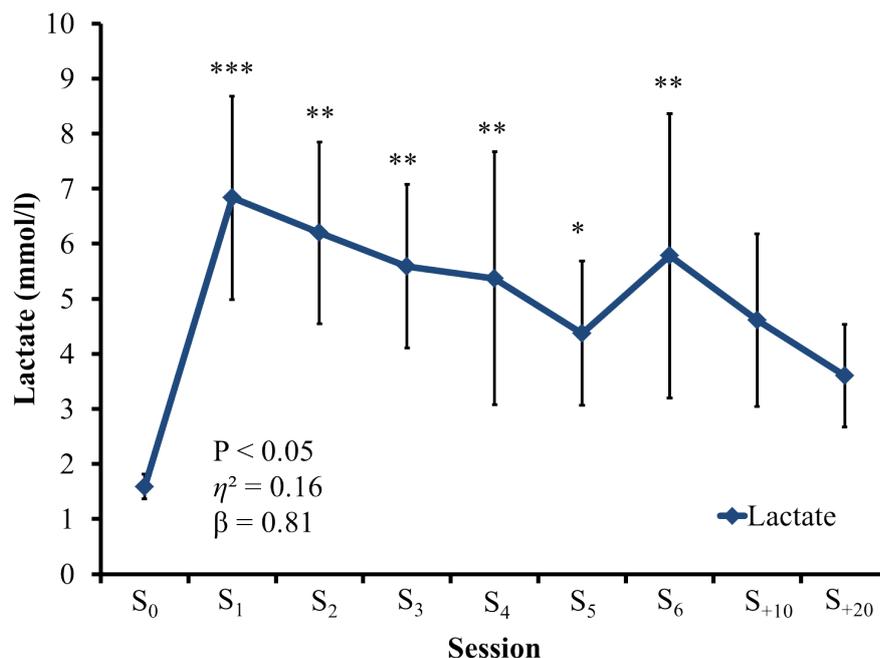


FIGURE 3.5 – Évolution du lactate sanguin au cours des différentes sessions, avec \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*\*\*  $p < 0.001$  avec S<sub>0</sub>

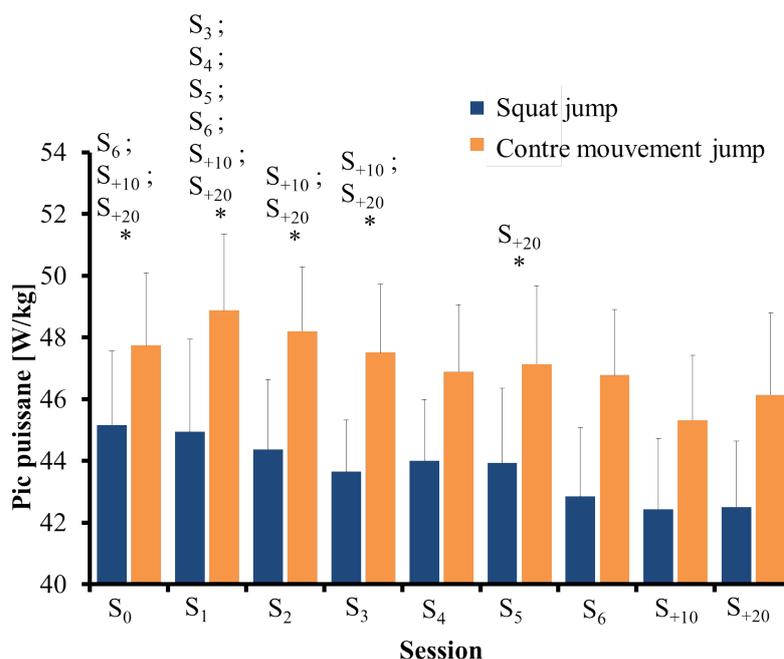


FIGURE 3.6 – Évolution de la puissance des membres inférieurs

De plus, le pic de puissance moyen est significativement ( $p < 0.001$ ) supérieur durant le CMJ (47.2 W/kg) que durant le SJ (43.7 W/kg). On relève une corrélation significative lors de la diminution de la puissance durant le SJ et le CMJ ( $R = 0.87$ ;  $p < 0.001$ ). La raideur des membres inférieurs ne diminue pas significativement, cependant, on peut observer une certaine tendance à diminuer (-8 %).

La force de préhension maximale des doigts ne semble pas évoluer durant le match ( $p > 0.05$ ) alors que la force de préhension de la main montre une forte diminution (-15 %) tout au long du match ( $p < 0.001$ ) (figure 3.11). De plus, on observe à travers les résultats une forte corrélation entre la force des fléchisseurs des doigts et de la main ( $R < 0.87$ ;  $p < 0.001$ ).

### 3.3.3.3 Résultat des données temporelles et notationnelles

À partir des traitements vidéos, nous avons pu extraire la durée moyenne des échanges (5.8 (0.3) s), la durée moyenne de repos (8.0 (0.3) s) et le TJE moyen (41.5 (1.4) %) (tableau 3.7). Les résultats montrent que la durée des échanges et le TJE durant chaque session ne sont pas significatifs ( $p > 0.05$  et  $p > 0.05$ ). Cependant, la durée de repos quant à elle, augmente significativement de +9 % ( $p < 0.05$ ). Tous ces résultats font émerger une forte corrélation entre la durée des échanges et la durée de repos ( $R > 0.74$ ;  $p < 0.001$ ). Pour compléter, la FE tend à diminuer significativement ( $p < 0.001$ ) au cours du match (-7 % et -9 %) en comptabilisant ou non le service (figure 3.7) et le nombre de F/E diminue significativement durant tout le match (-11 %;  $p < 0.001$ ).

En complément, le recueil des frappes montre une absence de changement de typologie des coups au cours du match (tableau 3.7). De plus, l’analyse du gain du point ne montre aucun effet significatif ( $p > 0.05$ ). Néanmoins, en regroupant les variables physiologiques et les variables temporelles, les résultats montrent une forte corrélation entre la FE et le rythme cardiaque ( $R = 0.88$ ;  $p < 0.001$ ) et entre le temps de repos et la FE ( $R = -0.88$ ;  $p < 0.001$ ). En couplant la FE et la durée des échanges, une corrélation moyenne émerge ( $R = 0.50$ ;  $p < 0.001$ ).

### 3.3.3.4 Variables psychologiques

Les joueurs ont tendance à augmenter la perception de leur effort des membres inférieurs et cardio-vasculaire au cours des différentes sessions ( $p < 0.001$ ). Les résultats montrent également que la perception de l’effort des membres inférieurs est fortement corrélée avec la perception cardio-vasculaire ( $R = 0.75$ ;  $p < 0.001$ ).

CHAPITRE 3. “CARACTÉRISATION” DE LA FATIGUE SUR LA PERFORMANCE LORS D’UN MATCH PROLONGÉ

Variabiles	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$p$	$\beta$	$\eta^2$
Durée des échanges (s)	5.8 (0.2)	6.2 (0.3)	5.9 (0.2)	5.9 (0.3)	5.5 (0.2)	5.5 (0.2)	0.417	0.30	0.17
Durée de repos (s)	7.7 (0.2)	7.8 (0.2)	7.8 (0.2)	8.0 (0.2)	8.3 (0.1)	8.4 (0.3)	< 0.001	0.49	0.95
TJE (s)	251 (6.1)	258.8 (7.4)	253.3 (7.7)	251.7 (7.7)	236.5 (5.9)	241.5 (6.6)	0.594	0.33	0.68
Dégagement (%)	16.4 (0.2)	17.7 (1.0)	16.3 (0.6)	18.0 (0.8)	17.7 (1.2)	16.6 (0.5)	0.857	0.07	0.13
Amorti (%)	15.3 (0.6)	16.9 (1.4)	16.0 (2.5)	16.8 (2.3)	16.7 (1.7)	16.1 (1.8)	0.794	0.08	0.15
Smash (%)	15.9 (0.4)	14.2 (0.8)	14.0 (0.7)	14.8 (0.7)	14.4 (0.6)	17.1 (0.6)	0.154	0.26	0.51
Contre-Amorti (%)	27.6 (0.2)	26.5 (1.0)	29.5 (1.1)	27.9 (1.1)	27.7 (1.1)	28.5 (0.8)	0.728	0.10	0.17

TABLEAU 3.7 – Analyse temporelle et notationnelle durant chaque session

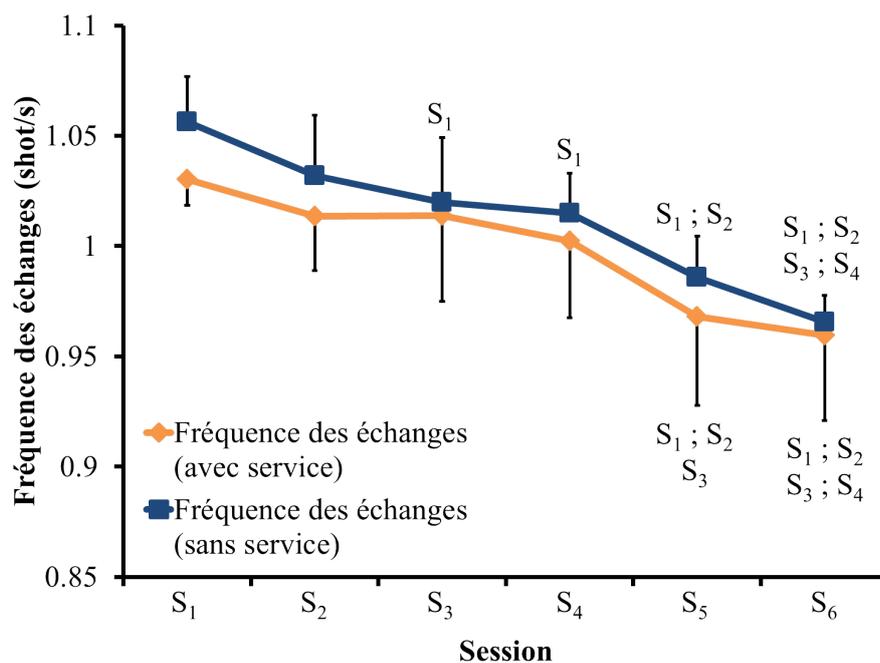


FIGURE 3.7 – Évolution de la FE au cours des sessions

### 3.3.4 Discussion

#### 3.3.4.1 Concentration de lactate sanguin et rythme cardiaque

Les caractéristiques temporelles du match montrent que la répétition à haute intensité des échanges couplé à une période de repos est concomitante avec un rythme cardiaque élevé. Les résultats de notre étude sont en lien avec ceux que l’on peut trou-

ver dans la littérature scientifique avec 4.4 mmol/L pour la concentration du lactate sanguin et  $\approx 170 - 180$  batt/min [Phomsoupha et Laffaye, 2015]. Cela représente  $\approx 85$  % de la FC maximale des participants, qui est légèrement inférieure à celle recensée dans la littérature dans les conditions de match [Phomsoupha et Laffaye, 2015]. Ces résultats suggèrent que l’énergie produite provient essentiellement de la glycolyse anaérobie et du métabolisme aérobie. Ils sont en adéquation avec les écrits précédents qui suggèrent que l’énergie durant un match de badminton provient pour 60 - 70 % du système aérobie et pour 30 % du système anaérobie.

Les valeurs élevées du rythme cardiaque tout au long du match induisent des capacités d’endurance importantes chez les joueurs (57.4 (5.3) ml/kg/min). Elles permettent de contribuer à l’élimination efficace du lactate [Messonnier *et al.*, 2001], à une meilleure ré-oxygénation de la myoglobine et à une plus grande resynthèse de la Phosphocréatine (PhCr) [Tomlin et Wenger, 2001]. Toutes ces adaptations physiologiques mettent en avant les mécanismes de l’organisme à freiner au maximum l’apparition de la fatigue musculaire dans le but de maintenir une haute intensité. En outre, la corrélation forte entre le rythme cardiaque et la FE ( $R = 0.88$ ;  $p < 0.05$ ) renforce l’idée que l’habileté à régénérer la PhCr dépend du processus d’oxydation et joue un rôle primordial dans les mécanismes de conservation de la performance physiologique durant un match de badminton.

### 3.3.4.2 Puissance des muscles des membres inférieurs

Les joueurs de badminton ont la capacité de se déplacer rapidement, de réaliser des fentes et de sauter, ce qui amène avec la répétition une fatigue musculaire des membres inférieurs. De ce fait, l’analyse de la raideur des joueurs de badminton est un révélateur dans la compréhension de la performance. Cependant, cette dernière a été très peu étudiée en badminton.

Notre étude révèle que la valeur moyenne des joueurs est de  $\approx 60.8$  kN/m avant le début des sessions. Ce résultat est bien plus important que les données que l’on peut trouver dans la littérature sur les activités de raquette tel que le tennis où la valeur moyenne est comprise entre 18.2 kN/m à 34.8 kN/m dans un échantillon hétérogène [Marquiritain, 2013]. Une explication plausible à la différence des valeurs résulte cer-

tainement de la méthode utilisée pour mesurer la raideur. Lors de notre étude, nous avons utilisé un accéléromètre qui surestime légèrement ( $\approx 8\text{kN/m}$ ) la raideur [Choukou *et al.*, 2014], alors que les autres études utilisent une plateforme de force ou un ergojump.

Malgré les différences méthodologiques, les joueurs de badminton semblent avoir une raideur musculaire plus importante que les joueurs de bon niveau en tennis, mais comparable aux experts en tennis. La raideur semble être un indicateur de la performance dans l’activité. L’augmentation croissante du nombre de “smash jump” (smash en extension) avec l’expertise, sollicite grandement les propriétés viscoélastiques des muscles des membres inférieurs, et peut expliquer le renforcement de la raideur.

Durant la phase de “reprise d’appui” ou “changement de direction”, l’action des joueurs peut être comparée. Ils rebondissent avant de se déplacer et de changer de direction (figure 3.8). Les joueurs semblent être capables d’adapter leur sursaut pour augmenter la vitesse de renvoi élastique en réduisant le temps de contact avec le sol, augmentant ainsi leur propre raideur musculaire.



FIGURE 3.8 – Exemple d’une reprise d’appui selon Laffaye [2011]

Notre étude montre également que la raideur musculaire ne diminue pas significativement avec la fatigue durant l’ensemble des sessions, malgré une tendance calculée de  $-8\%$ . Une telle diminution non-significative a déjà été relevée précédemment dans une étude où les auteurs ont analysé la répétition de plusieurs sprints [Choukou *et al.*, 2012], durant un match prolongé de tennis [Girard *et al.*, 2006]. Cependant, une corrélation entre la diminution de la puissance en SJ avec la raideur ( $R = 0.78$ ;  $p < 0.05$ ) et la diminution de la puissance en CMJ avec la raideur ( $R = 0.61$ ;  $p < 0.05$ ) révèlent une habileté des joueurs à maintenir un haut niveau de production de force et de puissance. Choukou *et al.* [2012] ont montré que face à la fatigue, l’organisme adapte les besoins neuromusculaires afin de maintenir la performance. Cette idée est renforcée

par la diminution non-significative de la raideur musculaire corrélée avec la diminution significative de la puissance neuromusculaire des membres inférieurs. Ainsi, le système nerveux central modifie les schémas de contrôle pour maintenir une raideur constante et régule l’organisation du mouvement en le modifiant pour limiter les effets de la fatigue neuromusculaire.

Les valeurs des pics de force obtenues durant un **SJ** ( $\approx 45.1$  W/kg) et un **CMJ** ( $\approx 48.8$  W/kg) sont comparables à celle de la littérature durant un match prolongé de tennis (44.4 W/kg en **SJ** et 45.4 W/kg en **CMJ**) [Girard *et al.*, 2006]. Cependant, les valeurs obtenues sont supérieures à celles trouvées précédemment avec des joueurs élités de badminton ( $\approx 30$  W/kg) [Abián-Vicén *et al.*, 2012]. Cette différence s’explique par une utilisation de la plateforme de force dans l’étude de Abián-Vicén *et al.* [2012], contrairement à l’utilisation d’un accéléromètre dans notre étude.

La hauteur de saut en **SJ** est de  $\approx 31.8$  cm et en **CMJ** de  $\approx 36$  cm. Elles sont légèrement inférieures à celles que l’on a pu trouver chez les joueurs nationaux espagnols ( $\approx 39$  cm en **CMJ**). Dans notre étude, les mains étaient fixes au niveau des hanches, alors que l’étude d’Abián-Vicén *et al.* [2012] ne bloquait pas l’action des bras. Cela a pour conséquence d’augmenter la performance lors du saut. La diminution de la puissance en **SJ** (-5.78 %) et en **CMJ** (-3.34 %) ne se retrouve pas dans l’étude d’Abián-Vicén *et al.* [2012]. Ils observent une production identique de la force des membres inférieurs du début à la fin du match. Cette absence de perte peut s’expliquer par le fait que les matchs étudiés se déroulaient en 35 min contre 1 heure dans notre étude. De plus, dans notre étude, les premiers effets de la diminution de la puissance se produisent vers la fin du match (à 50 min et après la fin du match). Nous pouvons supposer que la fatigue musculaire survient après les 50 premières minutes de match durant un effort intermittent.

La durée de repos entre les échanges ( $\approx 8$  secondes) semble être insuffisante pour les joueurs dans la resynthèse de l’ATP et de la PhCr [Glaister, 2005]. De ce fait, le temps de repos est un déterminant majeur pour limiter la fatigue dans un exercice intermittent à haute intensité. La force explosive des membres inférieurs ne semble pas être affectée par la pratique prolongée d’un match de tennis, avec une durée de repos



FIGURE 3.9 – Joueur épuisé après un échange en badminton

représentant 79 % du match [Girard *et al.*, 2006], tandis que cela affecte les joueurs de badminton avec un temps de pause proche de 59 %. Pour maintenir un haut niveau de performance, la récupération entre les échanges est primordiale dans la resynthèse de l’ATP et de la PhCr.

De plus, la perte hydrique et des glucides augmentent l’état de fatigue [Abián-Vicén *et al.*, 2012]. Durant notre étude, les joueurs ont perdu 1.3 (0.6) kg de leur masse corporelle, correspondant à environ 1.6 (0.7) % de leur masse totale, malgré l’absorption régulière d’eau. Cela peut expliquer la perte de la force explosive, comme le suggèrent les précédentes études d’Abián-Vicén *et al.* [2012] et de Girard *et al.* [2006]. En complément, le nombre important de sauts ( $\approx 925$  durant le match) et les mouvements excentriques au filet lors des différentes fentes ( $\approx 3170$ ), peuvent induire des “dommages” sur la structure musculaire [Cress *et al.*, 1992]. Ainsi, la perte de la raideur musculaire de -8 %, même si elle est non-significative, peut être due à l’altération neuromusculaire, suite à la diminution des commandes centrales du système nerveux ainsi qu’à celle de l’efficacité du muscle pendant les cycles étirement-renvoi.

### 3.3.4.3 Puissance des muscles des membres supérieurs

Très peu d’études se sont intéressées au changement de la force de préhension lors d’un match de badminton. Les valeurs de notre étude ( $\approx 5.5$  (1.3) N/kg et 44.2 (9.3) en valeur absolue) sont proches de celles des études d’Abián-Vicén *et al.* [2012] durant un match de badminton ( $\approx 47$  kg). Elles sont comparables à celles en tennis, avec des



FIGURE 3.10 – Transpiration d'un joueur de badminton durant un match

joueurs expérimentés, avec des valeurs comprises entre 46.5 kg et 61.0 kg [Kafkas *et al.*, 2014]. Lors des différentes frappes, les joueurs serrent la raquette (contraction isométrique) pour augmenter la vitesse du volant. Cette répétition continue du serrage du grippe ( $\approx 2200$  fois durant un match) génère une fatigue sur les muscles de préhension de la main.

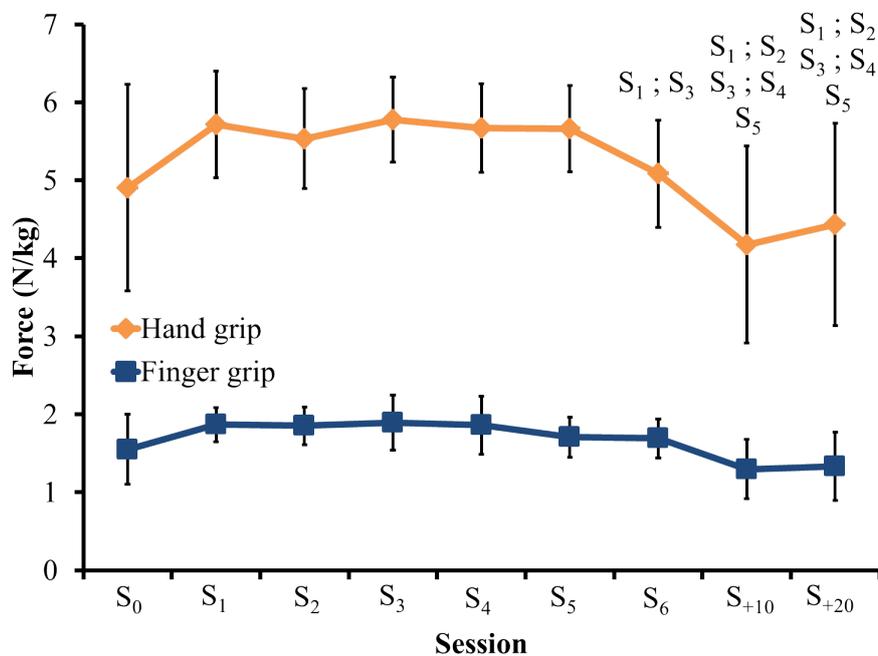


FIGURE 3.11 – Évolution de la force de la main et des doigts

Au cours de notre expérimentation, la force de préhension diminue au cours du temps (-44.5 %). Dans l'étude d'Abián-Vicén *et al.* [2012], la valeur ne change pas

avant et à la fin du match. Cette différence peut s’expliquer par le fait que le premier relevé a été réalisé avant le match et qu’elle n’est peut être pas la plus grande valeur. Notre étude montre que les valeurs augmentent pour atteindre leurs valeurs maximales après les 10 premières minutes du match et non avant son entame. Ce phénomène curieux peut être expliqué par un échauffement insuffisant [Girard *et al.*, 2006] ou par une augmentation de la température musculaire accroissant la transmission de la fréquence des impulsions nerveuses et une diminution de la résistance visqueuse [Bishop, 2003].

De plus, les joueurs de notre étude réalisent un match d’une heure, contre un match dans des conditions officielles ( $\approx 35$  minutes) dans l’étude d’Abián-Vicén *et al.* [2012]. En analysant l’évolution de la force de préhension, les premiers signes de diminution significative se produisent à  $\approx 50$  minutes de jeu. Les joueurs semblent donc être capables de maintenir un haut niveau de contraction isométrique durant un temps “classique” de match ( $\approx 35$  minutes).

La diminution de la force de préhension s’explique par l’altération de la force musculaire de l’épicondyle latéral du coude qui survient par la répétition des différentes frappes à grande vitesse du mouvement du bras [Kafkas *et al.*, 2014]. La répétition de la contraction isométrique durant les frappes puissantes représente 30.4 % des coups d’un match. La diminution de la force isométrique réduit la préhension de la raquette et influence la force de frappe [Kibler *et al.*, 2013]. Cela aura pour conséquence une diminution de la vitesse du volant, ce qui est aussi une explication plausible sur la diminution de la FE établie par notre étude.

### 3.3.5 Évolution des caractéristiques temporelles du match

Dans notre expérimentation, le temps caractéristique de la durée des échanges ( $\approx 6$  sec), de la durée de repos ( $\approx 8$  sec) et du TJE ( $\approx 42$  %) reflètent la nature intermittente de l’activité et est conforme à la littérature [Wonisch *et al.*, 2003]. En outre, nos valeurs sont proches de celles de Phomsoupha et Laffaye [2015] qui ont relevé un temps caractéristique moyen de la durée des échanges proche de  $\approx 7.6$  sec, en moyennant l’ensemble des études traitant sur le sujet.

Cependant dans notre étude, la durée de repos moyen est proche de  $\approx 8$  sec, repré-

sentant la moitié du temps de repos que l’on peut retrouver dans un match officiel ( $\approx 15$  sec). Cela a pour conséquence d’influencer le TJE qui devient ainsi plus important ( $\approx 42$  %) que celui que l’on retrouve dans la littérature ( $\approx 32.1$  %). Cela est facilement explicable par la consigne donnée en début d’expérience aux joueurs. Ils avaient pour instruction de limiter le temps de repos entre les échanges afin d’augmenter le temps de jeu. Malgré cette indication, la durée de repos reste sensiblement affectée par la DE précédent ( $R = 0.55$ ). Ce lien entre la durée des échanges et la durée de repos a pu être observé lors de l’analyse des différentes finales des JO ( $R = 0.38$ ) [Laffaye *et al.*, 2015] et pendant une compétition internationale ( $R = 0.87$ ) [Cabello Manrique *et González-Badillo*, 2003]. Cela montre que la durée des échanges génère une fatigue qui amène les joueurs à récupérer avant de s’engager dans un nouvel échange.

Cependant, un résultat observé montre que la durée de repos est davantage corrélée avec la FE ( $R = -0.88$ ). C’est à dire que lorsque l’intensité de l’échange est importante, le temps de repos augmentera. Ainsi, le temps accordé pour récupérer sera plus important lors d’un échange intense que lors d’un échange long.

La FE est un indicateur de l’intensité des échanges durant le match. Dans notre étude, la valeur moyenne est de  $\approx 1.0 \text{ sec}^{-1}$ , ce qui est proche des valeurs que nous avons pu trouver dans la littérature allant de  $\approx 0.92 \text{ sec}^{-1}$  dans l’étude de Faude *et al.* [2007] à  $\approx 1.3 \text{ sec}^{-1}$  durant la finale des JO de 2012 [Laffaye *et al.*, 2015]. Phomsoupha *et Laffaye* [2015] et Laffaye *et al.* [2015] suggèrent que la FE est un indicateur de l’expertise des joueurs. Celui-ci augmente lorsque le niveau des joueurs augmente. Cette corrélation peut être expliquée par une plus grande contraction musculaire des joueurs pour frapper le volant à de fortes vitesses. Ainsi, un tel lien révèle qu’un échange intense a pour conséquence des contractions musculaires importantes et nécessite ainsi un temps de repos plus long. En outre, cela montre que les facteurs temporels influent grandement sur les besoins énergétique lors d’un match.

### 3.3.5.1 Impact de la fatigue sur la performance de match

Le choix des frappes et le gain du point sont similaires durant l’ensemble des sessions. Cela traduit la conservation d’une même tactique de jeu durant le match malgré la présence de la fatigue. L’une des seules variables altérées par la fatigue est la FE,

avec une diminution de -7 %. Dans notre étude, la valeur diminue significativement de 1.06 à 0.97 s<sup>-1</sup>, suggérant que la fatigue impacte négativement la vitesse de jeu. Le nombre important de coups nécessitant un grand apport d’énergie tel que le smash (n ≈ 1246) ou le dégagement (n ≈ 925) augmente la dépense énergétique.

Avec l’apparition de la fatigue, l’intensité des échanges diminuent, réduisant ainsi la FE. Cette dernière peut se retrouver impacter par le choix du service (court ou long) afin d’augmenter le temps de repos entre les échanges. Cependant, l’utilisation du service long permet aux joueurs de récupérer quelques secondes supplémentaires afin de maintenir leurs efforts durant le match. Le service long est souvent sur-utilisé à la fin du match pour gagner ≈ 1.5 sec de temps de récupération. Pour analyser l’impact du service sur la FE, une analyse complémentaire a été réalisée en enlevant le service. En son absence, la FE diminue dans le même sens de 1.03 à 0.96 s<sup>-1</sup>, soit une diminution de -9.3 %. Aussi son absence n’explique donc pas la diminution de la FE. La modification des trajectoires (avec des trajectoires plus ascendantes) et la réduction de la vitesse de renvoi du volant peuvent expliquer la diminution au cours du temps de la FE.



FIGURE 3.12 – Abandon d’un joueur dû à la fatigue durant le match

### 3.3.5.2 Perception de la fatigue cardio-vasculaire et des membres inférieurs de l’effort

Au cours d’une pratique prolongée, la perception de l’effort (cardio-vasculaire et des membres inférieurs) augmente au cours du temps. Il est intéressant de souligner que les joueurs perçoivent une augmentation de la fatigue cardio-vasculaire alors que leur

rythme cardiaque reste élevé et stable durant toutes les sessions. Une telle dissociation a pu être observée précédemment durant un match prolongé en tennis [Girard *et al.*, 2006], suggérant que le stress cardio-vasculaire n’est pas le seul contributeur à la perception de l’effort. Millet et Lepers [2004] suggèrent que l’exercice induit des dommages musculaires, et les contractions excentriques en particulier, contribuent à l’augmentation de la perception de l’effort. Effectivement, les muscles des membres inférieurs en badminton subissent des phases de freinage, d’actions d’étirement-raccourcissement et des changements de directions intenses. Lee et Yoo [2012] ont montré que durant une phase intense de freinage de la jambe dominante durant une fente, le tendon d’Achille subit 6 à 12 fois la masse totale du joueur et 5 fois pour le tendon rotulien. Cette action de fente avant peut se répéter plus de 3170 fois durant un match.

L’augmentation de la perception de l’effort malgré la haute et constante valeur du rythme cardiaque peut être liée à la demande attentionnelle du match. En effet, la mise en œuvre d’une haute activité cognitive comme la tactique, combinée à une grande dépense énergétique induisent un niveau significatif de maîtrise de soi qui influe sur la façon dont les personnes pensent, se comportent et régulent les pensées négatives [Muraven et Baumeister, 2000]. Néanmoins, le self-contrôle est une ressource limitée qui est altéré par l’effort (ego déplétion). Par conséquent, l’ego déplétion dû à la haute demande physiologique et le stress cognitif permettent d’expliquer l’augmentation de la perception cardio-vasculaire et des membres inférieurs de l’effort [Baumeister *et al.*, 1998].

Pour conclure, cette étude met en exergue l’évolution des variables physiologiques, neuromusculaires et psychologiques durant un match et l’impact de la fatigue. Les joueurs sont capables de modifier leur comportement moteur afin de maintenir leur performance durant tout un match. De plus, nous avons pensé que la fatigue pouvait être un réel “frein” dans la performance, cependant, il semblerait que les joueurs s’adaptent afin de répondre le plus efficacement aux contraintes extérieures.

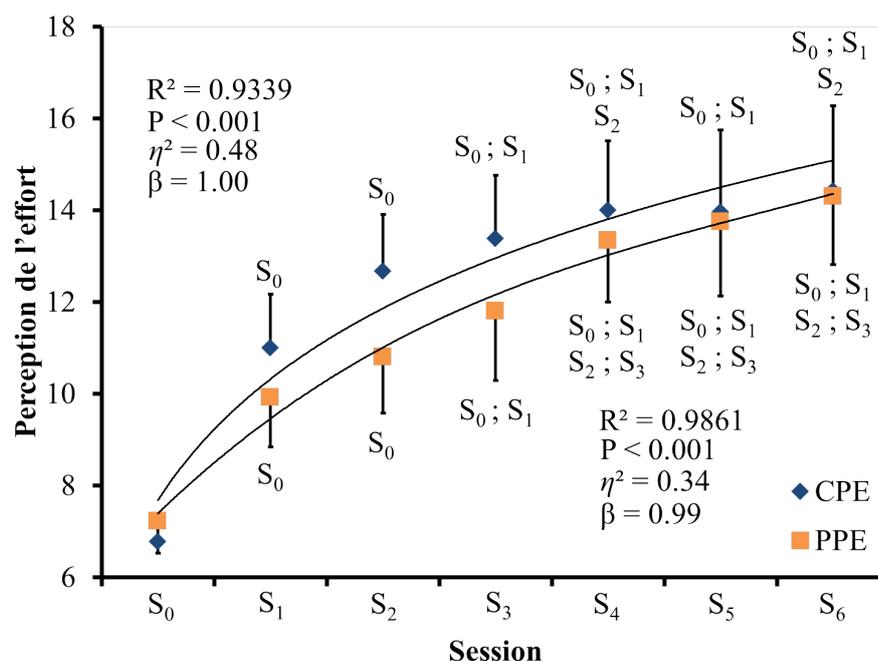


FIGURE 3.13 – Évolution de la perception de l’effort des membres inférieurs et cardiovasculaire au cours des sessions

### 3.4 Références

ABE, K., HAGA, S., KATO, M., NAKATANI, T., IKAMGI, R., USHIYAMA, Y. et TOGASHI, K. (1990). The work intensity of a badminton match in Japanese top male athletes. *Bulletin of Health and Sports Sciences*, 13:73–80. [115](#)

ABE, K. et OKAMOTO, S. (1989). *Badminton*. Tokyo : Gy édition. [115](#)

ABIÁN, J., del COSO, J., GONZÁLEZ, C., SALINERO, J. J., ABIÁN, P. et PÉREZ, B. (2011). Dehydration and muscle force production in badminton players during a national championship. *In II National Hydration Congress*, page 29. [107](#), [119](#)

ABIÁN, P., CASTANEDO, A., FENG, X. Q. et ABIAN, J. S. J. (2014). Notational comparison of men’s singles badminton matches between Olympic Games in Beijing and London. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 14:42–53. [107](#), [108](#), [110](#), [112](#), [119](#), [120](#)

ABIÁN, V. P., ABIÁN-VICÉN, J. et SAMPEDRO MOLINUEVO, J. (2012). Anthropometric analysis of body symmetry in badminton players. *International Journal of Morphology*, 30(3):945–951. [107](#)

- ABIAN-VICEN, J., CASTANEDO, A., ABIAN, P., GONZALEZ-MILLAN, C., SALINERO, J. J. et del COSO, J. (2013). Influence of successive badminton matches on muscle strength, power, and body fluid balance in elite players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(4):689–694. [107](#), [108](#)
- ABIAN-VICEN, J., CASTANEDO, A., ABIAN, P. et SAMPEDRO, J. (2013). Temporal and notational comparison of badminton matches between men’s singles and women’s singles. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 13(2):310–320. [108](#), [110](#), [111](#), [112](#), [113](#)
- ABIÁN-VICÉN, J., DEL COSO, J., GONZÁLEZ-MILLÁN, C., SALINERO, J. J. et ABIÁN, P. (2012). Analysis of dehydration and strength in elite badminton players. *PloS One*, 7(5):1–8. [119](#), [120](#), [132](#), [133](#), [134](#), [135](#)
- ANDERSEN, L. L., LARSSON, B., OVERGAARD, H. et AAGAARD, P. (2007). Torque-velocity characteristics and contractile rate of force development in elite badminton players. *European Journal of Sports Science*, 7(3):127–134. [114](#), [116](#), [117](#)
- ARARAGI, K., OMORI, M. et IWATA, H. (1999). The physiological studies on physical demands in competitive badminton : an investigation from the view points of energy expenditure, caloric intake and changes of blood constituents during a training camp. *In Acta Scholae Medicinalis Universitatis in Gifu*, volume 47, pages 215–227. Acta Scholae Medicinalis Universitatis, Gifu. [115](#)
- BAINBRIDGE, F. A. (1931). *The Physiology of Muscular Exercise*. Green and co édition. [120](#)
- BAUMEISTER, R. F., BRATSLAVSKY, E., MURAVEN, M. et TICE, D. M. (1998). Ego depletion : is the active self a limited resource? *Journal of Personality and Social Psychology*, 74(5):1252–1265. [138](#)
- BISHOP, D. (2001). Evaluation of the accusport lactate analyser. *International Journal of Sports Medicine*, 22(7):525–530. [118](#)
- BISHOP, D. (2003). Warm up I : potential mechanisms and the effects of passive warm up on exercise performance. *Sports Medicine*, 33(6):439–454. [135](#)

- BORG, G., LJUNGGREN, G. et CECI, R. (1985). The increase of perceived exertion, aches and pain in the legs, heart rate and blood lactate during exercise on a bicycle ergometer. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 54(4):343–349. [125](#)
- BOSQUET, L., MERCIER, D. et LÉGER, L. (1998). Validité de l’analyseur de lactate portatif Accusport. *Science and Sports*, 13(3):138–141. [118](#)
- BOTTOMS, L., SINCLAIR, J., TAYLOR, K., POLMAN, R. et FEWTRELL, D. (2013). The effects of carbohydrate ingestion on the badminton serve after fatiguing exercise. *Journal of Sports Sciences*, 30(3):285–293. [114](#), [118](#)
- CABELLO, D., PADIAL, P., LEES, A. et RIVAS, F. (2004). Temporal and physiological characteristics of elite women’s and men’s singles badminton. *International Journal of Applied Sports Sciences*, 16(2):1–26. [107](#), [108](#), [113](#), [115](#), [116](#), [117](#), [118](#)
- CABELLO MANRIQUE, D. et GONZÁLEZ-BADILLO, J. J. (2003). Analysis of the characteristics of competitive badminton. *British Journal of Sports Medicine*, 37(1):62–66. [107](#), [108](#), [113](#), [115](#), [116](#), [117](#), [118](#), [136](#)
- CHEN, H. L. et CHEN, T. C. (2008). Temporal structure comparison of the new and conventional scoring systems for men’s badminton singles in Taiwan. *Journal of Exercise Science and Fitness*, 6(1):34–43. [107](#), [108](#)
- CHEN, H. L., WU, C. J. et CHEN, T. C. (2011). Physiological and notational comparison of new and old scoring systems of singles matches in men’s badminton. *Asian Journal of Physical Education and Recreation*, 17(1):6–17. [112](#), [114](#)
- CHEN, I. S. et CHANG, C. M. (2011). Lighting quality in Taiwan’s badminton courts. *Journal of International Management Studies*, 6(1):4. [107](#), [108](#), [117](#), [118](#)
- CHEN, T. I., TSAI, P. H., LIN, J. H., LEE, N. Y. et LIANG, M. T. C. (2013). Effect of short-term heat acclimation on endurance time and skin blood flow in trained athletes. *Journal of Sports Medicine*, 4:161–170. [114](#), [115](#), [119](#)
- CHIN, M. K., WONG, A. S., SO, R. C., SIU, O. T., STEININGER, K. et LO, D. T. (1995). Sport specific fitness testing of elite badminton players. *British Journal of Sports Medicine*, 29(3):153–157. [107](#), [114](#), [116](#), [118](#)

- CHOUKOU, M. A., LAFFAYE, G. et HEUGAS-DE PANAFIEU, A. M. (2012). Sprinter’s motor signature does not change with fatigue. *European Journal of Applied Physiology*, 112(4):1557–1568. [131](#)
- CHOUKOU, M. A., LAFFAYE, G. et TAIAR, R. (2014). Reliability and validity of an accelerometric system for jumping performance. *Biology of Sport*, 31(1):55–62. [124](#), [131](#)
- CRESS, N. M., PETERS, K. S. et CHANDLER, J. M. (1992). Eccentric and concentric force-velocity relationships of the quadriceps femoris muscle. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 16(2):82–86. [133](#)
- DALLEAU, G., BELLI, A., VIALE, F., LACOUR, J. R. et BOURDIN, M. (2004). A simple method for field measurements of leg stiffness in hopping. *International Journal of Sports Medicine*, 25(3):170–176. [124](#)
- DIAS, R. et GHOSH, A. K. (1995). Physiological evaluation of specific training in badminton. In REILLY, T., HUGHES, M. G. et LEES, A., éditeurs : *Science and Racket Sports*, pages 38–43. London : E and FN Spon. [115](#)
- DOCHERTY, D. (1982). A comparison of heart rate responses in racquet games. *British Journal of Sports Medicine*, 16(2):96–100. [114](#)
- FACCINI, P. et DAL MONTE, A. (1996). Physiologic demands of badminton match play. *American Journal of Sports Medicine*, 24(6 supplement):64–66. [115](#), [116](#), [118](#)
- FAHIMI, F. et VAEZMOUSAVI, M. (2011). Physiological patterning of short badminton serve : a psychophysiological perspective to vigilance and arousal. *World Applied Sciences Journal*, 12(3):347–353. [117](#)
- FAUDE, O., MEYER, T., ROSENBERGER, F., FRIES, M., HUBER, G. et KINDERMANN, W. (2007). Physiological characteristics of badminton match play. *European Journal of Applied Physiology*, 100(4):479–85. [107](#), [108](#), [113](#), [115](#), [116](#), [117](#), [136](#)
- FUCHS, M., FAUDE, O., WEGMANN, M. et MEYER, T. (2014). Critical evaluation of a badminton-specific endurance test. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(2):249–255. [117](#)

- GHOSH, A. K. (2008). Heart rate and blood lactate responses during execution of some specific strokes in badminton drills. *International Journal of Applied Sports Sciences*, 20(2):27–36. [114](#), [118](#)
- GIRARD, O., LATTIER, G., MICALLEF, J. P. et MILLET, G. P. (2006). Changes in exercise characteristics, maximal voluntary contraction, and explosive strength during prolonged tennis playing. *British journal of sports medicine*, 40(6):521–526. [131](#), [132](#), [133](#), [135](#), [138](#)
- GLAISTER, M. (2005). Multiple sprint work : physiological responses, mechanisms of fatigue and the influence of aerobic fitness. *Sports Medicine*, 35(9):757–777. [132](#)
- GOWITZKE, B. A. et WADDELL, D. B. (1979). Technique of badminton stroke production : science in badminton. In TERAUDS, J., éditeur : *Racquet Sports*, pages 17–41. Del Mar, CA : Academic Publishers. [114](#), [115](#)
- GOWITZKE, B. A., WADDELL, D. B. et MACDOUGALL, J. D. (1990). Biomechanical and physiological measures of teen-aged badminton players. In *6 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 285–293. [116](#)
- HARMAN, E. A., ROSENSTEIN, M. T., FRYKMAN, P. N., ROSENSTEIN, R. M. et KRAMER, W. J. (1991). Estimates of human power output from vertical jump. *The Journal of Applied Sport Science Research*, 5:116. [124](#)
- HELLER, J. (2010). Physiological profiles of elite badminton players aspects of age and gender. *British Journal of Sports Medicine*, 44(i17):1–13. [114](#), [115](#), [116](#), [117](#), [120](#)
- HUGHES, M. (1994). Physiological demands of training in elite badminton players. In REILLY, T., HUGHES, M. G. et LEES, A., éditeurs : *Science and Racket Sports*, pages 32–37. London : E and FN Spon. [118](#)
- HUGHES, M. G. et FULLERTON, F. M. (1995). Development of an on-court aerobic test for elite badminton players. In REILLY, T., HUGHES, M. G. et LEES, A., éditeurs : *Science and Racket Sports*, pages 51–54. London : E and FN Spon. [115](#)
- JEYARAMAN, R., DISTRICT, E. et NADU, T. (2012). Prediction of playing ability in Badminton from selected anthropometrical physical and physiological characteristics among inter collegiate players. *International Journal of Advanced and Innovative Research*, 2(3):11. [115](#)

- KAFKAS, M. E., ŞAHİN KAFKAS, A., DURMUS, B. et AÇAK, M. (2014). Effects of a tennis tournament on players’ hand grip strength, pressure pain threshold and visual analogue scale. *Medicina dello sport*, 67(4):569–579. [134](#), [135](#)
- KI, Y. C., SUNG, H. K. et GU, H. M. (2002). Heart rate responses during badminton single matches. *International Journal of Applied Sports Sciences*, 15(1):88–101. [115](#)
- KIBLER, W. B., WILKES, T. et SCIASCIA, A. (2013). Mechanics and pathomechanics in the overhead athlete. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 32(4):637–651. [135](#)
- LAFFAYE, G. (2011). *Comprendre et progresser en Badminton*. Paris, chiron édition. [131](#), [IV](#)
- LAFFAYE, G., PHOMSOUPHA, M. et DOR, F. (2015). Changes in the game characteristics of a badminton match : a longitudinal study through the Olympic Game finals analysis in men’s singles. *Journal of Sports Science and Medicine*, 14:584–590. [107](#), [112](#), [125](#), [136](#)
- LAUKKANEN, R. et VIRTANEN, P. K. (1998). Heart rate monitors : state of art. *Journal of Sports Sciences*, 16(Suppl.):S3–7. [117](#)
- LEE, J. H. et YOO, W. G. (2012). Treatment of chronic Achilles tendon pain by Kinesio taping in an amateur badminton player. *Physical Therapy in Sport*, 13(2):115–119. [138](#)
- LEE, K. T., XIE, W. et TEH, K. C. (2005). Notational analysis of international badminton competition. *ISBS*, pages 387–390. [110](#)
- LEES, A. (2003). Science and the major racket sports : a review. *Journal of Sports Sciences*, 21(9):707–732. [113](#), [119](#)
- LIDDLE, S. D., MURPHY, M. H. et BLEAKLEY, W. (1996). A comparison of the physiological demands of singles and doubles Badminton a heart rate and time/motion analysis. *Journal of Human Movement Studies*, 29:159–179. [113](#), [114](#), [115](#), [116](#), [117](#)
- LIN, H., TONG, T. K., HUANG, C., NIE, J., LU, K. et QUACH, B. (2007). Specific inspiratory muscle warm-up enhances badminton footwork performance. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 32(6):1082–1088. [114](#), [117](#)

- MAJUMDAR, P., KHANNA, G. L., MALIK, V., SACHDEVA, S., ARIF, M. et MANDAL, M. (1997). Physiological analysis to quantify training load in badminton. *British Journal of Sports Medicine*, 31(4):342–345. [114](#), [115](#), [117](#), [118](#)
- MARQUIRRIAIN, J. (2013). The interaction between the tennis court and the player : how does surface affect leg stiffness? . *Sports Biomechanics*, 106:857–864. [130](#)
- MAUGHAN, R. J., SHIRREFFS, S. M., MERSON, S. J. et HORSWILL, C. A. (2005). Fluid and electrolyte balance in elite male football (soccer) players training in a cool environment. *Journal of Sport Sciences*, 23(1):73–79. [119](#)
- MESSONNIER, L., FREUND, H., FÉASSON, L., PRIEUR, F., CASTELLS, J., DENIS, C., LINOSSIER, M. T., GEYSSANT, A. et LACOUR, J. R. (2001). Blood lactate exchange and removal abilities after relative high-intensity exercise : effects of training in normoxia and hypoxia. *European Journal of Applied Physiology*, 84(5):403–412. [130](#)
- MIKKELSEN, F. (1979). Physical demands and muscle adaptation in elite badminton players. In TERAUDS, J., éditeur : *Science in Racquet Sports*, pages 55–67. Academic Publishers, Del Mar, California. [118](#)
- MILLET, G., LEPERS, R., LATTIER, G., MARTIN, V., BABAULT, N. et MAFFIULETTI, N. (2000). Influence of ultra-long-term fatigue on the oxygen cost of two types of locomotion. *European Journal of Applied Physiology*, 83(4–5):376–380. [120](#)
- MILLET, G. Y. et LEPERS, R. (2004). Alterations of neuromuscular function after prolonged running, cycling and skiing exercises. *Sports Medicine*, 34(2):105–116. [120](#), [138](#)
- MING, C. L., KEONG, C. C. et GHOSH, A. K. (2008). Time motion and notational analysis of 21 point and 15 point badminton match play. *International Journal of Sports Science and Engineering*, 02(04):216–222. [107](#), [108](#), [110](#), [111](#)
- MURAVEN, M. et BAUMEISTER, R. F. (2000). Self-regulation and depletion of limited resources : does self-control resemble a muscle? *Psychological bulletin*, 126(2):247–259. [138](#)
- OOI, C. H. et SIDEK, M. (2010). *Physiological strain in world class women badminton player during training and competition : a case study*, volume 3. Isn bullet édition. [114](#), [117](#)

- OOI, C. H., TAN, A., AHMAD, A., KWONG, K. W., SOMPONG, R., GHAZALI, K. A. M., LIEW, S. L., CHAI, W. J. et THOMPSON, M. W. (2009). Physiological characteristics of elite and sub-elite badminton players. *Journal of Sports Sciences*, 27(14):1591–1599. [115](#)
- OSWALD, E. (2006). A computer-aided comparison of the playing pattern of the world’s top male players and austrian top male players in single Badminton. *In IV Congreso Mundial de Ciencia y Deportes de Raqueta*, pages 1–10. [111](#)
- PEARCE, A. J. (2002). A physiological and notational comparison of the conventional and new scoring systems in badminton. *Journal of Human Movement Studies*, 43(1): 49–67. [117](#)
- PHOMSOPHA, M. et LAFFAYE, G. (2015). The science of badminton : game characteristics, anthropometry, physiology, visual fitness and biomechanics. *Sports Medicine*, 45(4):473–495. [117](#), [118](#), [119](#), [130](#), [135](#), [136](#)
- POPKIN, B. M., D’ANCI, K. E. et ROSENBERG, I. H. (2010). Water, hydration and health. *Nutrition Reviews*, 68(8):439–458. [122](#)
- RAMAN, D. et NAGESWARAN, A. S. (2013). Effect of game-specific strength training on selected physiological variables among badminton players. *International Journal of Scientific Research*, 2(10):1–2. [113](#), [116](#)
- SUBRAMANIAN, A. (2013). Investigation of the factors predominant to badminton playing ability. *Academic Sports Scholar*, 2(8):1–6. [116](#)
- TIWARI, L. M., RAI, V. et SRINET, S. (2011). Relationship of selected motor fitness components with the performance of badminton player. *Asian Journal of Physical Education and Computer Science in Sports*, 5(1):88–91. [113](#)
- TOMLIN, D. L. et WENGER, H. A. (2001). The relationship between aerobic fitness and recovery from high intensity intermittent exercise. *Sports Medicine*, 31(1):1–11. [130](#)
- TONG, Y. M. et HONG, Y. (2000). The playing pattern of world’s top single badminton players. *In 18 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 1–6. [110](#), [112](#)

van LIESHOUT, K. A. et LOMBARD, A. J. J. (2003). Physiological profile of elite junior badminton players in South Africa. *African Journal Physical, Health Education, Recreation and Dance*, pages 114–120. [113](#), [116](#)

WONISCH, M., HOFMANN, P., SCHWABERGER, G., von DUVILLARD, S. P. et KLEIN, W. (2003). Validation of a field test for the non-invasive determination of badminton specific aerobic performance. *British Journal of Sports Medicine*, 37(2):115–118. [114](#), [116](#), [135](#)



## Conclusion

Cette étude tend à montrer et expliquer les liens qui peuvent exister entre les caractéristiques tactiques d’un match de badminton et les changements métaboliques, neuromusculaires et physiologiques des joueurs. Les premiers résultats de cette étude nous montrent que les joueurs élités s’adaptent et maintiennent une performance à haute intensité en dépit de la fatigue générale. L’un des résultats majeurs de cette étude est l’impact d’un état de fatigue sur l’intensité des échanges que par la durée de ce dernier.

La durée du match n’influence pas les données physiologiques puisque les joueurs arrivent rapidement à leur rythme cardiaque maximal dès le début du match. Cependant, l’intensité des échanges joue un rôle dans la variation de la fréquence cardiaque. En moyenne, les joueurs sont proches de  $\approx 85\%$  de leur fréquence cardiaque maximale. De plus, celui-ci n’est pas perçu comme étant une contrainte par les joueurs mais la durée du match influence leur perception de leur fatigue cardio-vasculaire. De plus, la grande capacité aérobie des joueurs permet d’éliminer efficacement le lactate, puisque celui-ci connaît une diminution au cours du match.

Pour maintenir un haut niveau de performance sur les vitesses de frappe de volant, il nous semblait primordial de nous intéresser à la force des membres supérieurs (main et doigts). Très peu d’études se sont intéressées à la force de préhension ne nous permettant pas d’avoir de points de comparaison significatifs. Cependant, notre expérimentation met en exergue que la force de préhension est fortement affectée par la fatigue. Ainsi, la force de préhension doit être prise en considération comme un facteur de performance pour augmenter la vitesse de frappe. De plus, il est important de souligner que dans les différentes activités de raquette, y compris en badminton, les entraînements se concentrent sur les membres inférieurs et supérieurs mais très rarement sur les muscles périphériques tel que les muscles fléchisseurs du poignet. Notre

étude suggère que l’entraînement des muscles fléchisseurs de la main permettrait une meilleure résistance à la fatigue, et ainsi une meilleure conservation de la qualité de frappe tout au long du match et/ou du tournoi.

La fatigue influence les variables neuromusculaires des membres inférieurs par la répétition de fentes, de déplacements et de sauts. Au cours du match, la hauteur des différents sauts connaît une diminution expliquée par la fatigue. Cependant, au travers nos résultats, la raideur des joueurs est maintenue durant tout le match. Ainsi, le système nerveux adapte les besoins neuromusculaires afin de répondre et de maintenir la plus grande performance. De plus la fatigue perçue des membres inférieurs semblent être bien perçue puisque celle-ci diminue alors que la perception croît.

Au cours du match, nous nous attendions à observer une augmentation des fautes directes liée à une augmentation de la fatigue et une perte de lucidité. Cependant, nos résultats nous montrent que les joueurs sont capables de conserver un haut niveau de rigueur afin de maintenir l’échange. Cependant, une variable clé, montrant l’impact de la fatigue est la fréquence des échanges qui diminuent au cours des sessions. Elle est un révélateur de l’intensité des échanges et de l’impact de la fatigue. De plus, les joueurs modifient leur service afin de “gagner” quelques secondes dans leur récupération.

Les joueurs ont la capacité à répondre à l’impact de la fatigue afin de maintenir un haut niveau de performance. Par conséquent, pour optimiser la performance des joueurs, les chercheurs et les entraîneurs devraient prendre en considération l’état et l’impact de la fatigue comme une synergie de différentes variables.





## Troisième partie

# Optimisation et modélisation des mouvements du bras lors d'un smash et de la raquette de badminton



---

## Introduction

Au cours de la partie précédente, nous avons observé l'impact de la fatigue sur les performances des joueurs au cours d'un match prolongé. Nous avons pu mettre en exergue une variable clé de la performance, la fréquence des échanges. Celle-ci dépend de la vitesse des échanges, permettant au joueur de propulser le volant à de grandes vitesses. De plus, le projectile en badminton est considéré comme étant le plus rapide de tous les sports. L'analyse cinématique et cinétique de la frappe en badminton a souvent été analysée dans de nombreuses études biomécanique pour améliorer et optimiser les performances. Il nous semble important de prendre en compte les diverses étapes de la vitesse du volant à sa "création".

Plusieurs questions se sont posées à l'élaboration de cette partie, quels sont les moyens pour produire une grande vitesse de volant ? Quelles sont l'influence et la contribution des différents principes ? Peut-on les optimiser ? Peut-on produire une vitesse de volant à plus de 500 km/h ?

Au cours de cette partie, nous observerons en premier lieu l'influence du niveau d'expertise dans la production d'une vitesse de volant. Par la suite, nous chercherons à comprendre comment la raquette "transfère" et produit de la vitesse au volant lors du choc. Puis, nous nous étendrons sur la particularité de la raquette de badminton, la déflexion dans l'accroissement de la vitesse. Enfin, nous analyserons la cinématique du bras lors de la frappe chez les joueurs.



# Chapitre 4

## La vitesse du volant prédit-elle le niveau d'expertise ?

■ *Les limites sont une invention de l'Homme* ■

---

Yannick Agnel

### Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Évolution de la vitesse du volant lors d'un smash selon les différents niveaux de degrés d'expertise . . . . .</b>	<b>159</b>
4.1.1	Objectif . . . . .	160
4.1.2	Protocole expérimentale . . . . .	160
4.1.3	Résultats . . . . .	162
4.1.4	Discussion . . . . .	163
<b>4.2</b>	<b>Références . . . . .</b>	<b>166</b>

---



## 4.1 Évolution de la vitesse du volant lors d'un smash selon les différents niveaux de degrés d'expertise

Inscrit sur le premier drapeau du [Comité Internationale Olympique \(CIO\)](#), la devise olympique : “*Citius - Altius - Fortius*”, signifiant : “*Plus Vite, Plus Haut et Plus Fort*” prononcé par Pierre de Coubertin, amène les athlètes à repousser leurs limites et ainsi à augmenter leurs performances sportives. Il n'est pas rare de voir de nouveaux records tomber durant des compétitions majeures.

Le badminton est le sport de raquette le plus rapide avec un projectile pouvant atteindre les 493 km/h par le Malaisien Tan Boon Heong [[Phomsoupha et al., 2015](#)]. De plus, il est le sport le plus rapide générant la plus grande vitesse parmi tous les sports [[Cohen, 2015](#)] (figure 4.1).

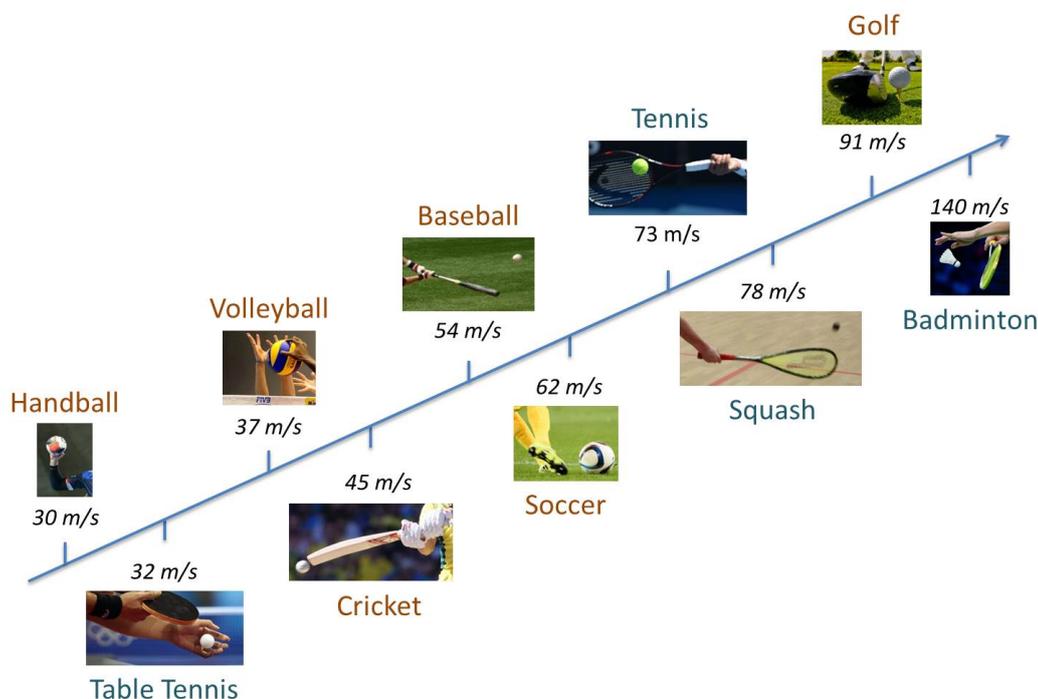


FIGURE 4.1 – Record du monde des différentes vitesses de projectile dans différents sports

L'évaluation de la vitesse d'un projectile et particulièrement du volant en badminton est un indicateur de la performance du joueur. Les différentes activités physiques

montrent que les grandes vitesses de projectile peuvent amener de grandes capacités physiques. Nous avons vu au cours de notre première partie, l'influence de l'aérodynamique sur le volant au cours de la frappe. Afin de se rendre compte des différentes vitesses de projectile, la figure 4.1 montre plusieurs activités où le projectile est envoyé à des vitesses importantes.

### 4.1.1 Objectif

Au cours de notre étude, nous voulons observer et avoir une première approche de la distinction qu'il peut y avoir entre un joueur de badminton débutant et un expert. Un des indicateurs que nous prenons en compte est la vitesse du volant lors d'un smash. Cette frappe permet d'avoir une idée précise du niveau du joueur puisque celui-ci traduit la maîtrise d'un geste efficient, demandant coordination et synchronisation afin de produire la plus grande vitesse. L'analyse cinématique de la technique de frappe du débutant et de l'expert semble montrer des différences selon le niveau d'expertise des joueurs [Sorensen *et al.*, 2011]. Celles-ci résultent d'une différence non négligeable de la vitesse du volant.

Nous pensons qu'au cours de cette expérimentation, chaque vitesse de projectile nous permettra d'avoir une idée et une catégorisation du niveau d'expertise. Il est attendu que les joueurs novices produisent la plus faible vitesse et que les joueurs à partir du niveau régional obtiennent plus ou moins des vitesses similaires.

### 4.1.2 Protocole expérimentale

Pour réaliser cette expérimentation, nous avons demandé à 77 personnes de participer à notre étude, de l'expert au non pratiquant (tableau 4.1). Les joueurs ont été catégorisés selon le système de classement français (FFBad, 2016) : les néophytes (non pratiquant), les débutants (aucun classement), intermédiaire (promotion), les avancés (départemental), expert (régional) et élite (national). Tous les athlètes étaient physiquement en bonne santé et n'ont signalé aucune blessure durant tout le temps de l'étude. Avant de venir participer à l'expérience, les participants se sont abstenus de boire de l'alcool ou des boissons à base de café les dernières 24 heures et ne se sont pas

alimentés durant les dernières 2 - 3 heures avant l'expérimentation, afin de réduire au maximum tous les effets pouvant interférer dans l'expérimentation.

Sujet	Age (ans)	Taille (cm)	Masse (kg)
Néophyte (n = 11)	25.6 (6.6)	180.1 (5.7)	76.5 (5.7)
Débutant (n = 15)	24.1 (9.1)	178.9 (6.0)	71.7 (8.0)
Intermédiaire (n = 23)	27.3 (9.1)	179.3 (6.0)	72.6 (8.8)
Avancé (n = 13)	25.0 (10.2)	178.8 (5.3)	73.7 (7.1)
Expert (n = 7)	24.0 (1.9)	180.0 (4.2)	75.0 (8.1)
Élite (n = 8)	26.1 (4.5)	180.5 (3.5)	77.3 (6.6)

TABLEAU 4.1 – Caractéristiques anthropométriques

#### 4.1.2.1 Design de l'expérimentation

Toutes les expérimentations ont eu lieu à la même heure de la journée (entre 10 et 12 h, à une température de 17.2 (1.1)°C et avec 52.3 (4.2 )% d'humidité) pour enlever toute influence des conditions extérieures sur la performance. Avant le début de l'expérimentation, les données anthropométriques des participants ont été relevées à l'aide d'une balance à impédance.

Après un échauffement général de 15 minutes, les sujets pouvaient effectuer autant de fois qu'ils le souhaitent la frappe du smash. Cela permettait de tester le matériel mais aussi d'avoir des instructions des expérimentateurs dans la réalisation du geste. La même raquette étaient utilisée durant toute l'expérimentation (Wilson Draco Blx ; 86 g ; 675 mm) avec une tension de 11 kg. Le participant devait réaliser 15 smashes. Il y avait 30 secondes de repos et la vitesse du volant était donnée entre chaque essai.

L'expérimentation se déroulait avec un joueur expérimenté servant au milieu du terrain afin que le participant puisse simuler un smash. Dans notre consigne, nous avons demandé aux joueurs de ne pas effectuer un smash en extension afin que les joueurs non initiés puissent avoir la même condition de frappe, car la présence du saut augmente la performance. Les joueurs avaient une cible à viser, un tapis de 2 mètres sur 2 mètres situé sur le terrain adverse. Les expérimentateurs étaient situés à l'arrière du terrain à 3 mètres du joueur, muni d'un radar Doppler qui recueille les vitesses (Stalker Sport system, Texas, US ) [Chelly et Denis, 2001]. Il a une fréquence d'acquisition de 250 Hz et une précision de 0.027 m/s. La figure 4.2 explique le dispositif mis en place. Dans le

chapitre précédent, nous avons validé précédemment le radar et l'accéléromètre. Nous avons choisi d'utiliser le radar puisqu'il permet de mesurer des vitesses supérieures à 325 km/h et nous avons dans notre échantillon d'experts, des joueurs pouvant atteindre voir franchir ce palier.

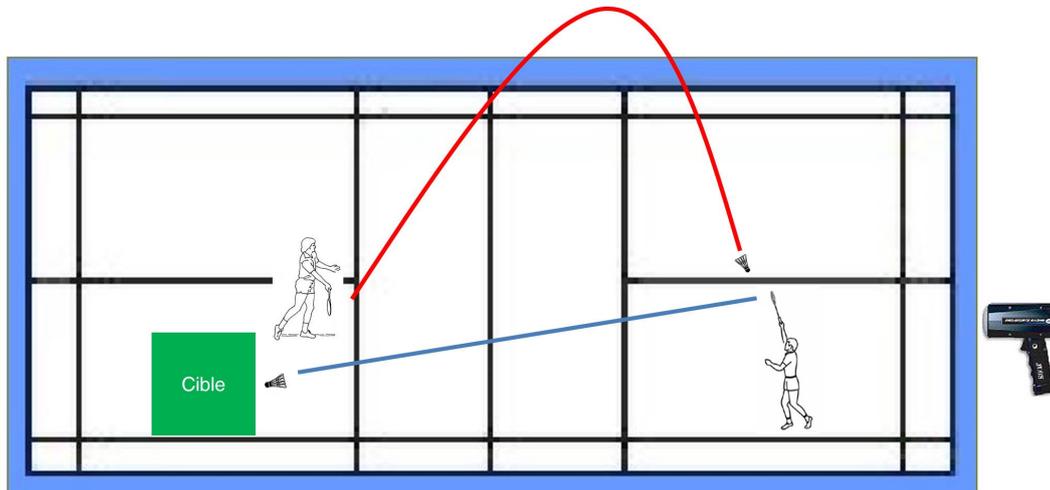


FIGURE 4.2 – Design de l'expérimentation

Les joueurs avaient pour consigne de smasher le plus fort possible sur la cible. Seuls les smashes touchant la cible ont été enregistrés pour traitement. Et la vitesse maximum était recueillie pour l'analyse statistique.

#### 4.1.2.2 Analyse statistique

Pour analyser l'ensemble des résultats, les 3 meilleures performances ont été conservées. La conception statistique nous a amené à réaliser une analyse de la variance à mesure répétée (ANOVA) sur les différents analyseurs enregistrés tout au long de l'expérience [Atkinson et Nevill, 1998]. Dans le cas où la variance était significative, nous procédions à un test Post Hoc de Fischer's. Le seuil d'acceptabilité était de  $p < 0.05$ . De plus, la fiabilité était analysée avec une ICC et un CV. L'ensemble des tests statistiques a été réalisé avec le logiciel Statistica 10 software (StatSoft Inc., Tulsa, US).

#### 4.1.3 Résultats

Au cours de notre expérimentation, nous avons pu observer un résultat que nous pouvions envisager. Les joueurs élités produisent des vitesses de volant plus importantes

que les débutants. Les résultats nous montrent que la grande fiabilité de la méthode permet d'obtenir un coefficient de corrélation intra-classe (ICC) = 0.96 et un coefficient de variation < 4.3 % [Atkinson et Nevill, 1998; Hopkins, 2000]. Les valeurs obtenues sont comprises entre 24.44 m/s et 81.66 m/s (figure 4.3).

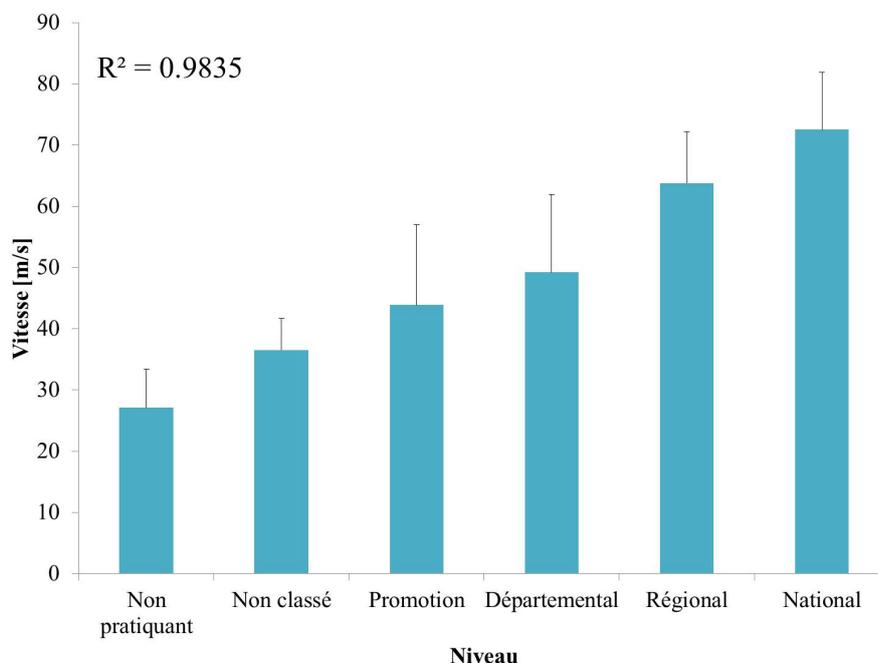


FIGURE 4.3 – Vitesse du volant selon le niveau d'expertise durant un smash

#### 4.1.4 Discussion

La vitesse du volant est un évaluateur du niveau d'expertise d'un joueur. Les résultats montrent un effet de l'expertise sur le smash ( $p < 0.001$ ) avec une grande différence entre les sujets ( $p < 0.05$ ). Cela signifie que plus le niveau d'expertise augmente, plus les joueurs sont capables de générer de plus grandes vitesses de volants. Cependant, un résultat inattendu est l'absence d'un "plateau de vitesse" (particulièrement entre les experts et les élites). Cela montre que les élites ont la capacité d'optimiser les principes biomécaniques afin d'être plus efficaces. De plus, cela renforce l'idée qu'il est possible d'augmenter la vitesse du volant même après avoir optimisé les principes du mouvement du bras.

Notre expérimentation met en avant l'augmentation de la vitesse (+138 %) liée à l'expertise. Ceci permet de mettre en évidence les grands principes d'efficacités biomé-

caniques qui ont été précédemment identifiés par [Waddell et Gowitzke \[2000\]](#) :

- i) utilisation de la séquence proximo-distale. L'action est générée par les muscles les plus proches du tronc, initiant le début de l'action jusqu'aux muscles périphériques [[Gowitzke et Waddell, 1979](#); [Lee, 1993](#)]. Il est possible de l'illustrer comme l'action du fouet [[Waddell et Gowitzke, 2000](#)];
- ii) l'enchaînement de la frappe en continue [[Niesner et Rantzmayer, 1982](#)]. Lors du début de l'action de frappe, le mouvement doit suivre un séquençage avec la rotation de la hanche et des articulations inter-vertébrales dans la direction de la frappe. La rotation de la hanche est inversée au mouvement de l'articulation inter-vertébrale. Lorsque ce dernier suit le même sens de rotation que celui de la hanche, le mouvement latéral de rotation de l'articulation de l'épaule commence. En même temps, la flexion du coude et la supination radio-ulnaire ont lieu. Par la suite, la rotation médiale de l'épaule commence, alors même que le coude et l'action du radio-ulnaire n'ont pas été complétés. Pour conclure la frappe, le coude s'étend et la pronation radio-ulnaire se produit [[Gowitzke et Waddell, 1977, 1979](#); [Waddell et Gowitzke, 2000](#)];
- iii) une frappe utilisant un minimum de temps et une grande impulsion. La puissance idéale d'une frappe est considérée comme le produit de la force et du temps. Lorsque le geste a un temps très court, les muscles sont rapidement étirés et permettent de produire une force importante. Cela permet de recueillir l'avantage des propriétés musculaires et des réflexes myotatiques et proprioceptifs du muscle [[Waddell et Gowitzke, 2000](#)];
- iv) le mécanisme de la raquette. La raquette de badminton est élastique et facilement déformable. Les propriétés élastiques permettent d'influencer la vitesse finale du volant [[Kwan et al., 2010](#)].

De plus, cette étude permet d'étudier la vitesse du volant au cours de sa trajectoire. Elle révèle une décélération élevée du projectile au cours du temps en raison de la haute contrainte aérodynamique. La vitesse du volant diminue de moitié à environ 0.05 seconde et diminue d'1/5 après 0.25 seconde à partir de sa vitesse initiale (voir figure 4.4).

Par ailleurs, selon l'approche théorique de [Cohen et al. \[2014\]](#), il est attendu d'obtenir une relation linéaire entre  $\frac{1}{vitesse}$  et le temps. La figure 4.5 avec un  $R^2 = 0.98$ ,

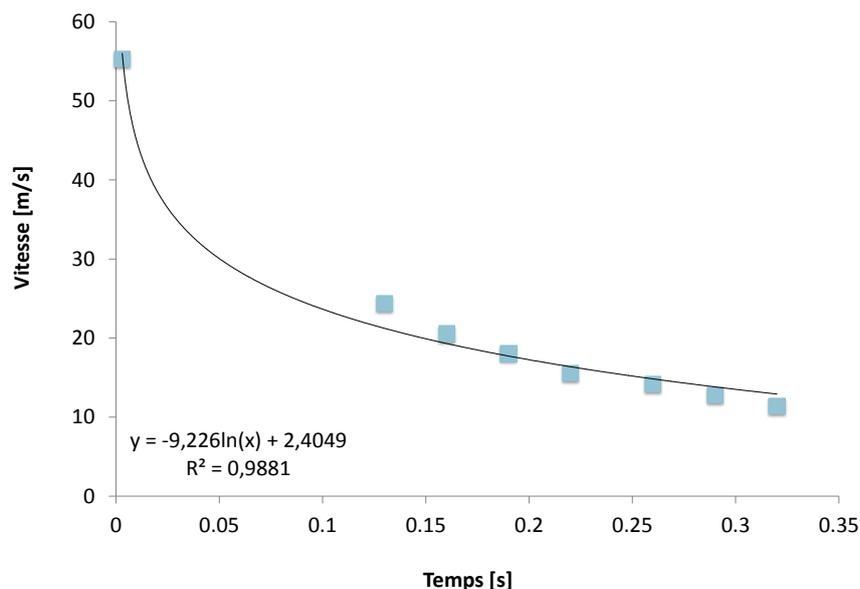


FIGURE 4.4 – Évolution de la vitesse du volant au cours du temps durant un smash

confirme que la contrainte aérodynamique joue un rôle primordial sur la vitesse. L'équation correspond à la vitesse initiale ( $\frac{1}{V_0}$ ) et la pente caractéristique du volant comme étant  $\frac{1}{L}$  avec  $L = \frac{2M}{\rho S C_D}$  (avec L la longueur aérodynamique, M la masse du volant (0.005 kg),  $\rho$  la densité de l'air ( $1.2 \text{ kg/m}^3$ ), S la coupe transversale du projectile et  $C_D$  le coefficient de traînée (0.64). Dans notre étude, la pente est proche de 0.22. Elle est exactement la même que le gradient théorique recueilli par [Cohen et al. \[2015\]](#), renforçant l'idée que le volant est soumis à de fortes contraintes aérodynamiques.

Pour conclure, cette étude montre que la vitesse du volant est dépendante du niveau d'expertise du joueur. Elle peut évoluer selon certains principes biomécaniques comme la coordination de la chaîne proximo-distale, le cycle étirement-renvoi mais aussi les propriétés musculaires du joueur et les propriétés de la raquette de badminton. En complément de cela, les contraintes aérodynamiques montrent qu'à la différence d'une balle de tennis, le volant perd la moitié de sa vitesse à 0.05 seconde. Cela semble avoir une grande influence sur la vitesse.

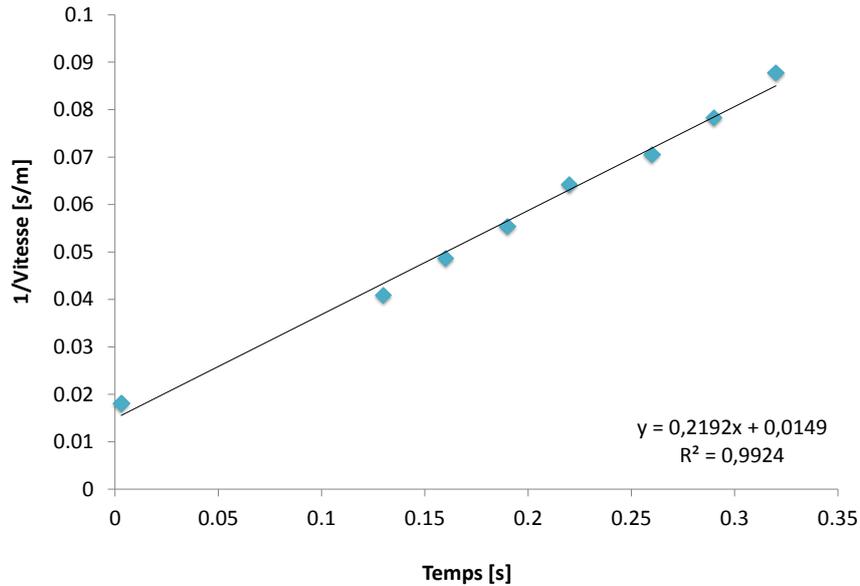


FIGURE 4.5 – Relation linéaire entre la vitesse inversée et le temps

## 4.2 Références

ATKINSON, G. et NEVILL, A. M. (1998). Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. *Sports Medicine*, 26(4):217–238. [162](#), [163](#)

CHELLY, S. M. et DENIS, C. (2001). Leg power and hopping stiffness : relationship with sprint running performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(2):326–333. [161](#)

COHEN, C. (2015). *La physique du sport*. Thèse de doctorat. [159](#)

COHEN, C., DARBOIS-TEXIER, B., BRUNEL, E., QUÉRÉ, D. et CLANET, C. (2014). The aerodynamic wall. *Proceedings of the Royal Society*, 470:1–20. [164](#)

COHEN, C., DARBOIS-TEXIER, B., QUÉRÉ, D. et CLANET, C. (2015). The physics of badminton. *New Journal of Physics*, 17(6):1–17. [165](#)

GOWITZKE, B. A. et WADDELL, D. B. (1977). The contributions of biomechanics in solving problems in badminton stroke production. *In International Coaching Conference*. [164](#)

- GOWITZKE, B. A. et WADDELL, D. B. (1979). Biomechanical principles applied to badminton stroke production. *In Proceedings of the International Congress of Sport Sciences*, pages 7–16. [164](#)
- HOPKINS, W. G. (2000). Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Medicine*, 1:1–15. [163](#)
- KWAN, M., SKIPPER ANDERSEN, M., CHENG, C. L., TANG, W. T. et RASMUSSEN, J. (2010). Investigation of high-speed badminton racket kinematics by motion capture. *Sports Engineering*, 13(2):57–63. [164](#)
- LEE, B. K. (1993). The effects of the kinematic link principle on performance. *In 11 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 239–242. [164](#)
- NIESNER, H. W. et RANTZMAYER, J. (1982). Basic theory of stroke production. *Newsletter of the German Badminton Federation*. [164](#)
- PHOMSOUPHA, M., LAFFAYE, G., COHEN, C. et CLANET, C. (2015). How to use the elasticity of a badminton racket to increase its speed by 80%? *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 18(Suppl 1):2028–2029. [159](#)
- SORENSEN, K., de ZEE, M. et RASMUSSEN, J. (2011). A biomechanical analysis of clear strokes in badminton executed by youth players of different skill levels. *In Congress of the International Society of Biomechanics*, page 2. [160](#)
- WADDELL, D. B. et GOWITZKE, B. A. (2000). Biomechanical principles applied to badminton power stroke. *In 18 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 1–6. [164](#)



# Chapitre 5

## Comprendre, prévoir, optimiser et modéliser la raquette de badminton lors d'un smash

■ *La vie est l'arc; et la corde est le rêve* ■

---

Romain Rolland

### Sommaire

---

<b>5.1</b>	<b>Et le cordage de la raquette dans tout cela ?</b>	<b>171</b>
5.1.1	Les propriétés du cordage	171
5.1.2	La tension du cordage	172
<b>5.2</b>	<b>Modèle de la conservation de la quantité de mouvement lors d'une frappe</b>	<b>174</b>
<b>5.3</b>	<b>Le coefficient de restitution de l'énergie élastique du cordage</b>	<b>175</b>
5.3.1	Dispositif expérimental	176
5.3.2	Résultat expérimental	177
<b>5.4</b>	<b>Références</b>	<b>178</b>

---



## 5.1 Et le cordage de la raquette dans tout cela ?

La tête d'une raquette de badminton est composée de cordage. Il existe de nombreux types de cordage avec des propriétés différentes. Le cordage occupe une place aussi importante que la raquette et sa déflexion. Le fait que le temps de contact soit extrêmement rapide de 5 à 6 ms [Cohen *et al.*, 2014; Hussain et Arshad Bari, 2011; Miller, 2006; Phomsoupha et Laffaye, 2015], montre l'importance de la restitution de l'énergie de la déflexion par le biais du cordage. Les paramètres importants sont sa tension et sa jauge. Ainsi, il convient d'observer ce que nous dit la littérature spécialisée et les industriels sur le cordage.

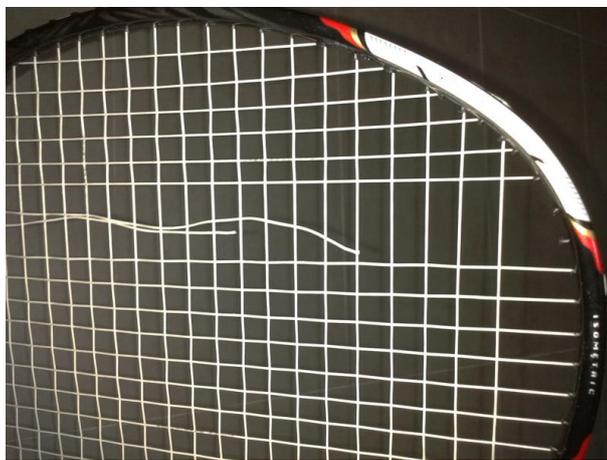


FIGURE 5.1 – Illustration d'un cordage rompu

### 5.1.1 Les propriétés du cordage

Au cours de notre recherche scientifique, nous n'avons trouvé aucun article scientifique expliquant l'importance des propriétés du cordage lors d'une frappe en badminton. Les informations que nous avons pu recueillir proviennent des industriels.

L'une des premières informations que l'on trouve sur les cordages concerne l'épaisseur de la jauge (le diamètre du cordage), variant de 0.65 à 0.75 mm. Cette jauge influence la durabilité et les sensations lors de la frappe. Il est commun de dire qu'un cordage épais (plus de 0.72 mm) offre une plus grande durabilité, mais réduit la sensation de frappe. À l'inverse, un cordage fin (proche de 0.68 mm), offre de meilleures sensations mais qui est moins durable dans le temps.

Le cordage de badminton est décomposé en plusieurs “gammes” selon la structure et la composition. Ces paramètres influencent grandement la frappe et les sensations chez le joueur. Le cordage peut se définir selon 5 propriétés importantes : la durabilité (durée de vie), la puissance de répulsion, l’absorption des chocs, le contrôle et le son lors de la frappe. La figure 5.2 montre les différentes compositions d’un cordage et les modifications qu’elles peuvent entraîner sur les propriétés de celui-ci.

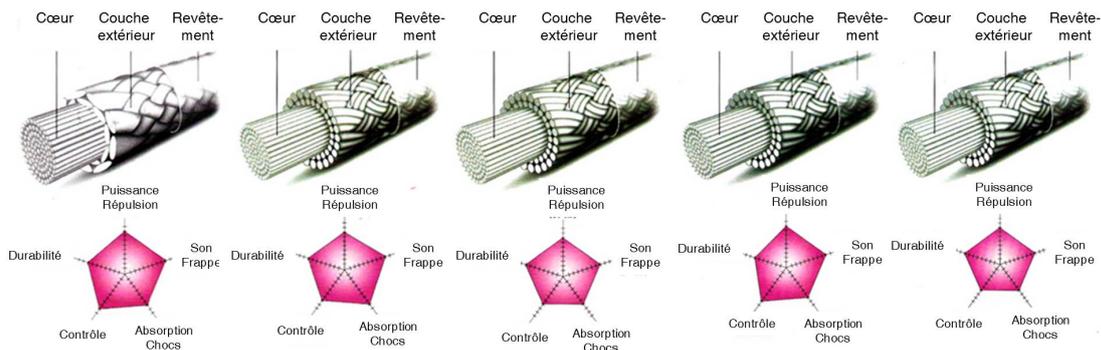


FIGURE 5.2 – Compositions et propriétés de différents cordages

Les industriels en connaisseurs des propriétés des cordages, proposent des gammes étendues afin de valoriser certaines caractéristiques. Les figures 5.3, 5.4 et 5.5 mettent en avant différents modèles de cordage proposés par un industriel afin de répondre aux besoins de chaque pratiquant.

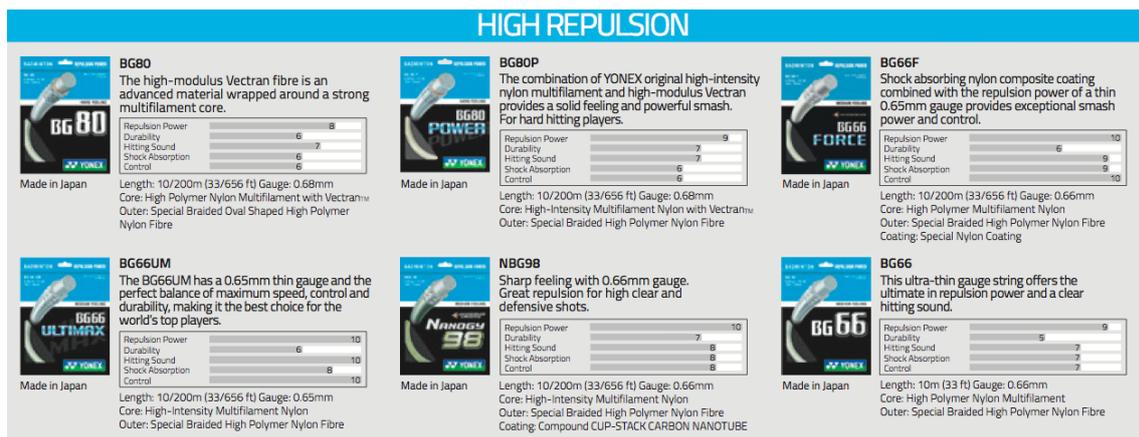


FIGURE 5.3 – Gamme de cordage mettant en avant la puissance de répulsion

### 5.1.2 La tension du cordage

La tension du cordage est un paramètre qui a davantage été étudié en tennis. Bower et Cross [2005] définissent la tension comme le résultat direct du rebond et du renvoi

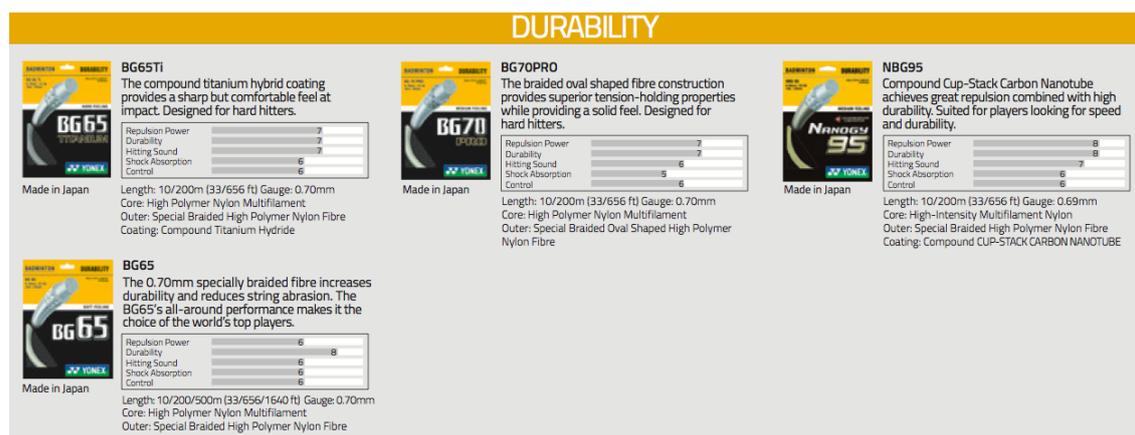


FIGURE 5.4 – Gamme de cordage mettant en avant la durabilité



FIGURE 5.5 – Gamme de cordage mettant en avant le son et le contrôle

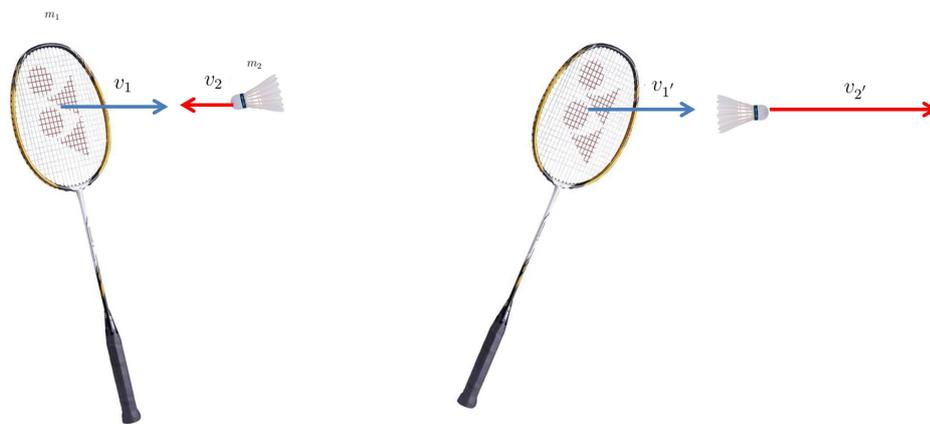
d'un projectile vers une cible. Une tension élevée permet au joueur d'avoir un meilleur contrôle durant sa frappe [Vanasant *et al.*, 2013]. De plus, dans le cas d'une tension faible, le joueur peut générer davantage d'énergie et de puissance mais aura plus de chance de réaliser une erreur lors de la frappe [Baker et Wilson, 1978; Bower et Sinclair, 1999; Brannigan et Adali, 1980; Brody, 1979].

La tension diminue au cours du temps suite au relâchement des contraintes de la raquette [Vanasant *et al.*, 2013]. De plus, plusieurs facteurs extérieurs peuvent augmenter la dégradation telle que la température ou encore l'humidité. Les recherches scientifiques sont encore faibles sur ce sujet. Le manque de connaissances et de compréhension sur la tension du cordage en badminton amènent généralement les pratiquants à choisir leur raquette selon leur ressenti, leur expérience ou encore en comparaison avec d'autres joueurs. Cette méconnaissance peut être contre-productive, et amener une perte de performance. Les retours proprioceptifs ne peuvent pas être des indicateurs valables de la performance dans le domaine scientifique [Vanasant *et al.*, 2013].

En tennis, de nombreuses recherches sur le cordage ont été élaborées. Nous pouvons

les considérer comme similaire pour le badminton. La tension de la raquette a une forte influence sur la vitesse du volant [Vanasant *et al.*, 2013]. Les tensions faibles permettent d'obtenir de meilleurs rebonds et ainsi accroître la vitesse du volant [Baker et Wilson, 1978; Bower et Sinclair, 1999; Brannigan et Adali, 1980; Brody, 1979]. À l'inverse, les fortes tensions permettent d'accroître le contrôle [Vanasant *et al.*, 2013].

## 5.2 Modèle de la conservation de la quantité de mouvement lors d'une frappe



(a) Gamme de cordage mettant en avant la puissance de répulsion (b) Gamme de cordage mettant en avant la durabilité

FIGURE 5.6 – Impact entre la raquette de masse  $m_1$  et de vitesse  $v_1$  et le volant de masse  $m_2$  et de vitesse  $v_2$

Le choc lors d'une frappe entre le volant et le cordage contribue à la vitesse finale du volant. Cela est dû à la conservation de la quantité de mouvement [Kwan *et al.*, 2010]. Pour comprendre ce phénomène lors d'un choc, nous allons prendre en considération le modèle de Cohen [2015] et le transposer à la frappe en badminton.

L'approche globale du modèle consiste à réaliser un bilan de la quantité du mouvement lors d'un choc. On définit la vitesse de la raquette  $v_1$  et du volant  $v_2$  avant l'impact et  $v_1'$  et  $v_2'$  la vitesse de la raquette et du volant après impact (figure 5.6).

En badminton, le contact entre le cordage et le volant est extrêmement bref ( $\tau \approx 6$  ms) [Cohen *et al.*, 2014; Hussain et Arshad Bari, 2011; Miller, 2006; Phomsoupha et

Laffaye, 2015]. Le modèle néglige la présence et l'action des forces extérieures sur le système que l'on définit comme étant (raquette + volant), ainsi la quantité de mouvement est conservée. En projetant sur un axe horizontal, la relation entre le système nous donne :

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_{1'} + m_2v_{2'} \quad (5.1)$$

Dans notre expérimentation, le volant est initialement au repos pour permettre au joueur de se focaliser uniquement sur une forte accélération du bras lors de la frappe, ainsi  $v_2 = 0$ . Cohen [2015] exprime le rapport de la vitesse maximale du volant  $v_{2'}$  avec la vitesse maximale de la raquette  $v_1$  que le joueur est capable d'atteindre, avec  $e = 0.64$ , à partir des équations 5.1 et 5.3 :

$$\frac{v_{2'}}{v_1} = \frac{1 + e}{1 + m_2/m_1} \quad (5.2)$$

Le modèle cherche à mettre en avant le rapport de vitesse entre la vitesse maximale du volant après l'impact et la vitesse maximale de la raquette. Lors du choc avec le volant, la masse du volant ( $m_2 = 5$  g) est extrêmement faible par rapport à celle de la raquette ( $m_1 = 88$  g). Nous pouvons en déduire que  $v_{2'}/v_1 = 0.94(1 + e)$ . Ainsi, on obtient des mesures des rapports de vitesse autour de 1.6 quelque soit la vitesse de l'impacteur. De plus lors du chapitre précédent, nous avons pu démontrer que le rapport de vitesse était linéairement relié entre  $v_{volant}/v_{raquette} \approx 1.6$ . Ainsi, le modèle que propose Cohen [2015] sur la conservation de la quantité de matière peut être utilisé dans la prédiction de la vitesse du volant.

### 5.3 Le coefficient de restitution de l'énergie élastique du cordage

Lors de l'impact entre le cordage et le volant, la zone optimale d'échange d'énergie se situe au centre de la raquette [Miller, 2006]. Pour une raquette au repos, le coefficient de restitution maximum se trouve au centre de masse de la tête de raquette. Cependant, il nous a semblé important de comprendre l'intérêt du coefficient d'énergie en badminton.

Le coefficient de restitution  $e$  est défini comme étant le coefficient intervenant lors

de l'étude d'une collision entre deux objets. Il est défini comme étant le rapport des vitesses relatives après et avant l'impact de deux objets :

$$e = \frac{v_2' - v_1'}{v_2 - v_1} \quad (5.3)$$

avec  $v_1$  et  $v_2$  étant les vitesses initiales respectives entre l'impacteur et le volant et  $v_1' - v_2'$  étant les vitesses après le choc.

Le coefficient obtenu est compris entre 0 et 1. Lorsque  $e$  est proche de 0, la vitesse s'annule après la collision avec le deuxième objet. Plus explicitement, lorsque la raquette est fixée au sol et à une vitesse nulle ( $v_1 = v_1' = 0$ ), le volant ne rebondit pas du tout. On peut dire que le choc est "inélastique". À l'inverse, si  $e$  se rapproche de 1, il n'y a pas de dissipation d'énergie lors de l'impact, et l'énergie restituée est qualifiée "d'élastique" ( $v_2 = v_2'$ ) [Cohen, 2015]. La raquette est encore fixée au sol et à une vitesse nulle, le volant rentre en contact avec le cordage et conserve la même vitesse d'avant impact lorsque celui-ci rebondit.

### 5.3.1 Dispositif expérimental

Avant toute chose, il nous semblait important de calculer le coefficient de restitution  $e$  de notre cordage. Pour cela, nous avons utilisé une raquette de badminton (Wilson Draco BLX ; 86g ; 675 mm) tendue avec un cordage (jauge : 0.69 mm ; tension : 12 kg). La raquette était fixée à plat au sol et ne pouvait pas bouger. Plusieurs marqueurs réfléchissants étaient fixés sur la raquette selon le modèle de Kwan *et al.* [2008]. Ils étaient placés sur le bas et le haut du manche, sur la tige de raquette et sur la tête de raquette (haut, bas, gauche et droite). Le volant était aussi équipé d'un marqueur réfléchissant fixé sur le bouchon afin de pouvoir être enregistré par la caméra.

Pour compléter le dispositif expérimental, 9 caméras de capture de mouvement (Vicon V8i) enregistraient à une fréquence d'enregistrement de 1000 Hz avec une précision de 0.1 mm (Vicon Peak, Oxford, Royaume-Unis).

Le volant était lâché à des hauteurs différentes de 50 cm à 2 mètres et avec des vitesses initiales différentes. De plus, il était primordial d'avoir comme zone de colli-

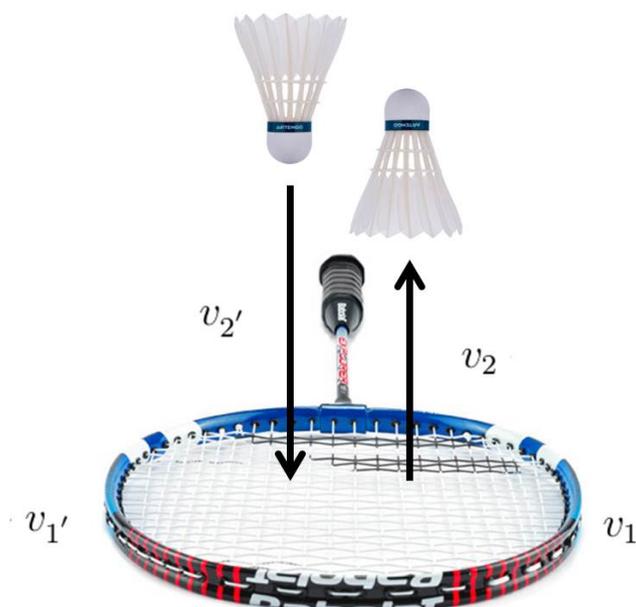


FIGURE 5.7 – Dispositif expérimental pour calculer le coefficient de restitution  $e$

sion le centre de masse de la tête de raquette afin d'obtenir le meilleur coefficient de restitution. Pour cela, nous avons tracé une zone sur le cordage de la raquette (10 cm sur 10 cm) sur laquelle le volant devait atterrir.

### 5.3.2 Résultat expérimental

Dans notre expérimentation, la raquette est initialement au repos soit :  $v_1 = 0$ . La variable qui nous intéresse est le rapport de vitesse du volant après l'impact avec le cordage pouvant ainsi nous permettre d'obtenir le coefficient de restitution. Ainsi l'on obtient :  $e = v_2'/v_2$ . La figure 5.8 nous donne l'enregistrement de l'une des vitesse du volant lorsque celui-ci est lâché à une hauteur ( $h = 1.80$  m), lorsqu'il rebondit sur la raquette. Il est ainsi possible de connaître la vitesse avant collision et après collision.

La figure 5.9 met en avant l'ensemble des résultats que nous avons pu recueillir au cours de notre expérimentation. On peut observer que quelque soit la hauteur et la vitesse de collision avant et après, nous obtenons un coefficient de restitution proche de  $e = 0.64$  pour un cordage et un volant de badminton.

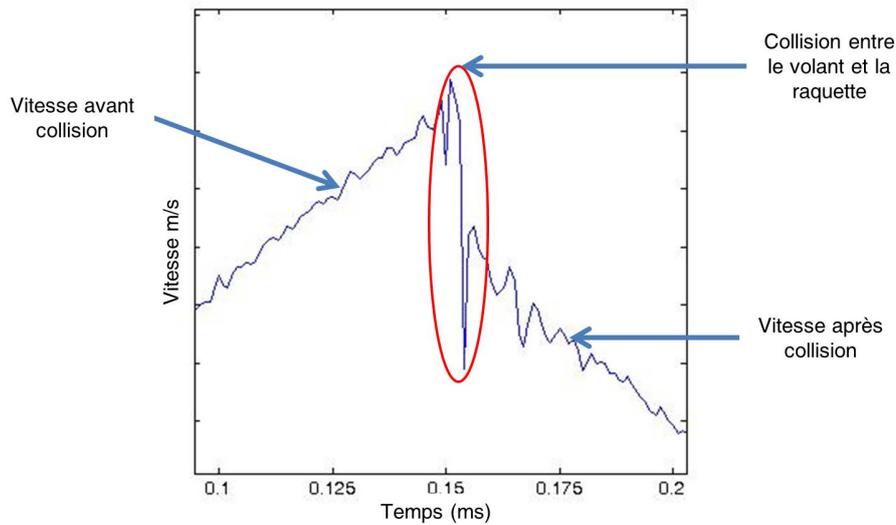


FIGURE 5.8 – Résultat du coefficient de restitution

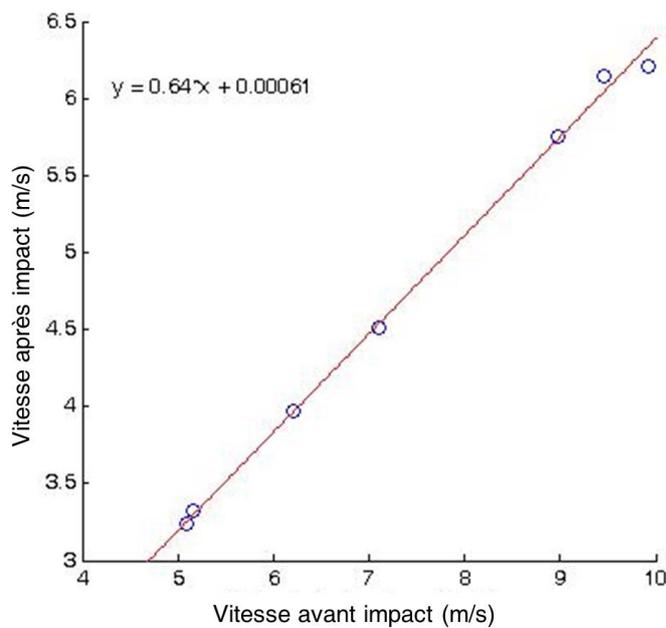


FIGURE 5.9 – Vitesse après impact sur vitesse avant impact

## 5.4 Références

BAKER, J. et WILSON, B. (1978). The effect of tennis racket stiffness and string tension on ball velocity after impact. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 49:255–259. 173, 174

BOWER, R. et CROSS, R. (2005). String tension effects on tennis ball rebound speed and accuracy during playing conditions. *Journal of Sports Science*, 7(23):765–771.

- BOWER, R. et SINCLAIR, P. (1999). Tennis racket stiffness and string tension effects on rebound velocity and angle for an oblique impact. *Journal of Human Movement Studies*, (37):271–286. [173](#), [174](#)
- BRANNIGAN, M. et ADALI, S. (1980). Mathematical modeling and simulation of a tennis racket. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, (1):44–53. [173](#), [174](#)
- BRODY, H. (1979). Physics of the tennis racket. *American Journal of Physics*, 47:482–487. [173](#), [174](#)
- COHEN, C. (2015). *La physique du sport*. Thèse de doctorat. [174](#), [175](#), [176](#)
- COHEN, C., DARBOIS-TEXIER, B., BRUNEL, E., QUÉRÉ, D. et CLANET, C. (2014). The aerodynamic wall. *Proceedings of the Royal Society*, 470:1–20. [171](#), [174](#)
- HUSSAIN, I. et ARSHAD BARI, M. (2011). Kinematical analysis of forehand and backhand smash in badminton. *Innovative Systems Design and Engineering*, 2(7):20–26. [171](#), [174](#)
- KWAN, M., SKIPPER ANDERSEN, M., CHENG, C. L., TANG, W. T. et RASMUSSEN, J. (2010). Investigation of high-speed badminton racket kinematics by motion capture. *Sports Engineering*, 13(2):57–63. [174](#)
- KWAN, M., SKIPPER ANDERSEN, M., ZEE, M. et RASMUSSEN, J. (2008). Dynamic Model of a Badminton Stroke (P254). In *The Engineering of Sport 7 SE - 69*, pages 563–571. Springer Paris. [176](#)
- MILLER, S. (2006). Modern tennis rackets, balls, and surfaces. *British journal of sports medicine*, 40(5):401–5. [171](#), [174](#), [175](#)
- PHOMSOPHA, M. et LAFFAYE, G. (2015). The science of badminton : game characteristics, anthropometry, physiology, visual fitness and biomechanics. *Sports Medicine*, 45(4):473–495. [171](#), [174](#)
- VANASANT, T., MINGKHUMLERT, S. et LIMROONGREUNGRAT, W. (2013). The effect of string tension on shuttlecock velocity. In *31 International Conference on Biomechanics in Sports*, pages 28–31. [173](#), [174](#)



# Chapitre 6

## Modélisation biomécanique et physique du comportement de la raquette de badminton

■ *Je vais laisser ma raquette répondre* ■

---

John McEnroe

### Sommaire

---

<b>6.1</b>	<b>La raquette de badminton</b>	<b>185</b>
6.1.1	Un peu d'histoire, de l'origine...	185
6.1.2	... à sa conceptualisation de nos jours	187
6.1.3	Les propriétés dynamiques de la raquette : la déflexion de la tige	188
<b>6.2</b>	<b>La déflexion de la raquette avec un vérin</b>	<b>190</b>
6.2.1	Objectif	190
6.2.2	Protocole expérimental	190
6.2.3	Résultats expérimentaux	192
<b>6.3</b>	<b>Modélisation de la déflexion de la raquette</b>	<b>195</b>
6.3.1	Théoriquement, du modèle ...	195
6.3.2	... à la pratique	196
<b>6.4</b>	<b>Prédiction de la vitesse du volant : un modèle physique validé par l'expérimentation</b>	<b>197</b>

CHAPITRE 6. MODÉLISATION BIOMÉCANIQUE ET PHYSIQUE DU  
COMPORTEMENT DE LA RAQUETTE DE BADMINTON

---

6.4.1	L'importance de la déflexion de raquette durant un smash . .	197
6.4.2	Résultats expérimentaux . . . . .	200
<b>6.5</b>	<b>Références . . . . .</b>	<b>203</b>

---

*Ce travail a été réalisé avec la collaboration de Caroline Cohen et Christophe Clanet*





## 6.1 La raquette de badminton

La littérature spécialisée s'intéresse très peu à la raquette de badminton. À la différence d'une raquette de tennis (figure 6.1a) ou de squash (figure 6.1b), la tige de la raquette peut se "déformer". Cette torsion est communément appelée "déflexion" (figure 6.2). Cependant, la complexité de la raquette de badminton (figure 6.1c) n'a pas amené les chercheurs à étudier ce phénomène étrange de "déflexion", ni à chercher à la modéliser et à la comprendre.

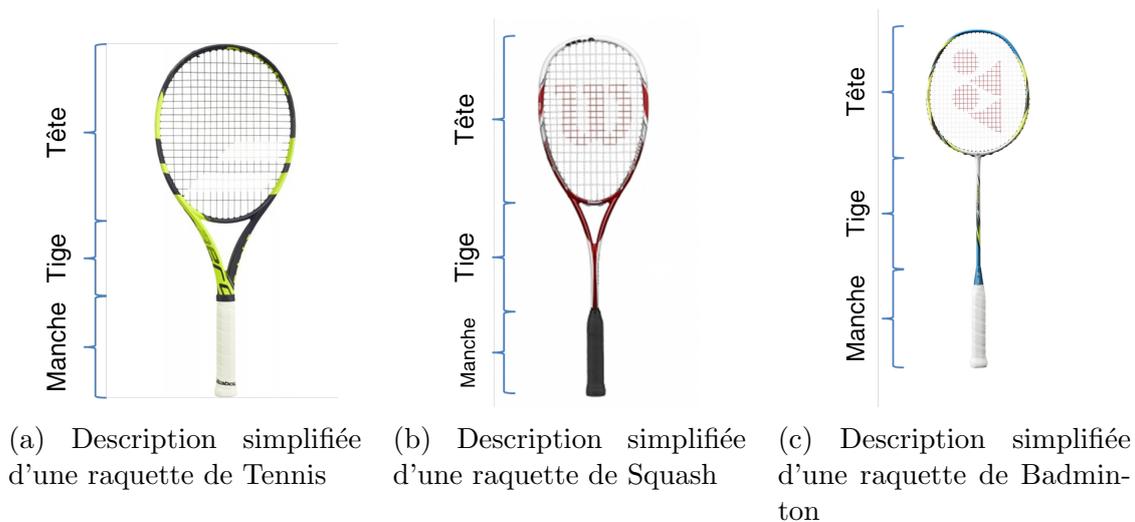


FIGURE 6.1 – Description simplifiée de différentes raquettes



FIGURE 6.2 – Déformation de la tige de la raquette lors d'un smash

### 6.1.1 Un peu d'histoire, de l'origine...

Les premières traces de la raquette de badminton se situent au 17<sup>ème</sup> siècle au Japon avec l'apparition du jeu de "l'hagoita" (figure 6.3a). Les battoirs étaient alors ornés de peintures à l'effigie des dieux japonais [Guillain, 2002]. Avec l'arrivée de la "raquette",

deux pratiques différentes émergent. La première activité est “l’oibane”. L’objectif est pour deux partenaires de jeu de s’envoyer alternativement un volant (figure 6.3b). La seconde, nommée “tsukibane” est avant tout une activité individuelle dans laquelle le joueur cherche à faire rebondir un maximum de fois le volant avec la raquette (figure 6.3c).



(a) Demoiselles japonaises jouant à “l’Hagoita”

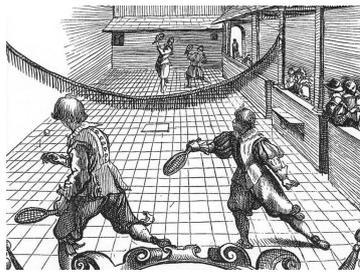
(b) Demoiselles japonaises jouant à “l’Oibane”

(c) Représentation de demoiselles japonaises pratiquantes de “Tsubikane”

FIGURE 6.3 – Demoiselles japonaises pratiquantes de l’Hagoita, l’Oibane et le Tsubikane durant la fin du 19<sup>ème</sup> siècle

Un ancêtre de la raquette existait également en Amérique du Nord dans les tribus indiennes de Bella Coola, Hesquiat, Nimpkish et Kwatiutl. Cet objet retrouvé au 18<sup>ème</sup> siècle était composé d’une latte en bois fixée à un manche ou à une planche de bois [Sweeting et Wilson, 1992]. En Europe, la raquette et le battoir ont été créés afin de protéger la main durant le “Jeu de Paume” au cours du Moyen-Age [Guillain, 2002]. Les premiers écrits parlant d’une raquette remontent aux années 1505. Il s’agit d’un texte dans lequel le Roi de Castille, Philippe le Beau et le Marquis de Dorset jouaient au “Jeu de Paume” (figure 6.4a). En ce temps, il existait deux types de raquette : une simple raquette en bois couverte de parchemin et une raquette avec un manche, une osature en bois et une tête de raquette recouverte de cordages [Sweeting et Wilson, 1992].

Durant les années 1950, l’acier et la fibre de verre ont commencé à remplacer le bois. Il est éventuellement possible de remplacer ces matériaux par de l’aluminium, du carbone ou du graphite [Kwan et Rasmussen, 2011]. Ces matériaux ont rendu la raquette plus rigide, plus légère et plus puissante. Elle peut ainsi supporter de fortes tensions de cordage pouvant dépasser plus de 16 kg [Kwan et Rasmussen, 2011]. Toutes ces évolutions technologiques ont accru la vitesse du jeu [Laffaye et al., 2015]. Malgré toutes ces avancées technologiques, le lien entre la conception et la performance des



(a) Représentation du Jeu de Paume



(b) Raquette utilisée durant le Jeu de Paume



(c) La petite fille à la raquette de Jean Siméon Chardin

FIGURE 6.4 – Représentation du jeu et de la raquette utilisée durant le “Jeu de Paume”

raquettes reste encore un mystère...

### 6.1.2 ... à sa conceptualisation de nos jours

Les équipementiers ont développé un large panel de nouvelles raquettes en se fondant sur l'intuition des joueurs et l'expérience du constructeur. La performance des raquettes est souvent évaluée par les appréciations de joueurs. La raquette de badminton “souffre” de sa complexité et du manque de recherches scientifiques à son encontre. La littérature scientifique s'est plus intéressée à la raquette de tennis [Brody, 1995, 1997, 2000; Cross, 1998, 2001, 2006] (figure 6.1), les clubs de golf [Milne et Davis, 1992; Worobets et Stefanyshyn, 2007] et la batte de baseball [Fleisig *et al.*, 2009; Nathan, 1992; Smith *et al.*, 2003]. Les sports de raquette partagent certaines similitudes, néanmoins les différences qui existent entre le badminton et le tennis sont assez importantes pour justifier l'étude de la conceptualisation d'une raquette de badminton [Kwan et Rasmussen, 2011].

La raquette de badminton est composée de plusieurs parties : le manche, le top cap, la tige, le t, la tête et la zone de cordage (figure 6.5). Les propriétés importantes de la raquette sont répertoriées en deux catégories principales : les propriétés de raideur et celles de masse [Kwan *et al.*, 2008a,b]. Ces caractéristiques de la raquette sont souvent nommées par les industriels comme étant la flexibilité et l'équilibre des masses. La flexibilité d'une raquette est une mesure spécifique, généralement évaluée de 1 (très flexible) à 5 (très rigide). L'équilibre des masses se réfère à la localisation du centre de masse, mesuré du grippe à la tête de raquette. Plusieurs études ont montré que la vitesse de “swing” est corrélée avec le moment d'inertie lors de l'impact entre la raquette

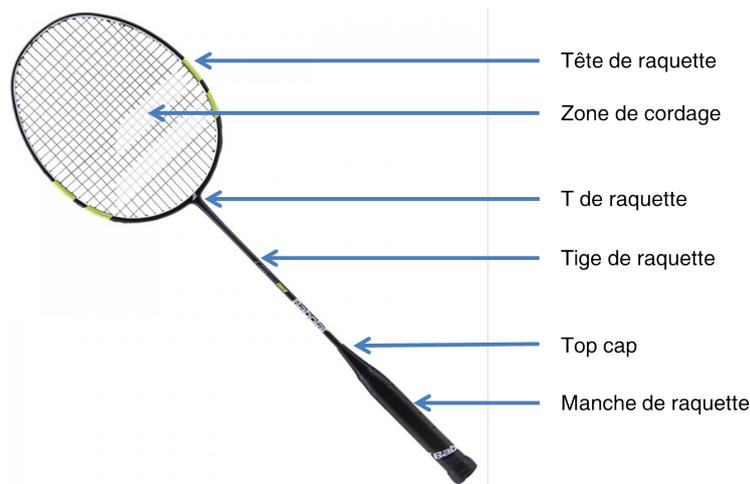


FIGURE 6.5 – “Anatomie” d’une raquette de badminton

et le volant [Cross, 2001, 2006; Fleisig *et al.*, 2009; Mitchell *et al.*, 2000; Nathan, 1992; Smith *et al.*, 2003]. Cela indique que le moment d’inertie de la raquette est un facteur d’optimisation décisif dans la vitesse d’exécution de la raquette.

Les études, Montagny [2003], Kwan et Rasmussen [2011] et Kwan *et al.* [2008a] ont observé l’importance de la raideur de la raquette et les différentes répartitions de masse. Ils ont pu mettre en avant une modification importante lors de l’impact et un coefficient de restitution différent selon les caractéristiques de la raquette. Les innovations technologiques quant à elles et l’évolution du matériel tendent à rendre les raquettes de plus en plus légères, améliorant la performance et la vitesse du volant [Singh et Yogesh, 2010].

### 6.1.3 Les propriétés dynamiques de la raquette : la déflexion de la tige

Le mouvement du bras lors de la frappe génère des accélérations et des vitesses sur plusieurs axes et plans (rotation et translation) qui modifient les propriétés mécaniques de la raquette [Kwan *et al.*, 2010a, 2008a, 2010b, 2008b]. De manière simplifiée, une frappe en badminton est définie par 4 phases (figure 6.6) :

- la phase d’armement ;
- la phase d’accélération ;
- le contact entre la raquette et le volant ;
- la phase d’accompagnement.

Dans des activités comme le football et le volleyball, les membres anatomiques (bras et jambes) jouent un rôle essentiel dans le transfert d'énergie [Cohen *et al.*, 2014]. En badminton, la vitesse réalisée par le bras lors d'une frappe quelconque, amène la raquette [Kwan et Rasmussen, 2011] à transférer l'énergie au moment de l'impact avec le volant [Jaitner et Wolf, 2007; Kwan *et al.*, 2010a, 2008a, 2010b, 2008b; Rasmussen *et al.*, 2010].

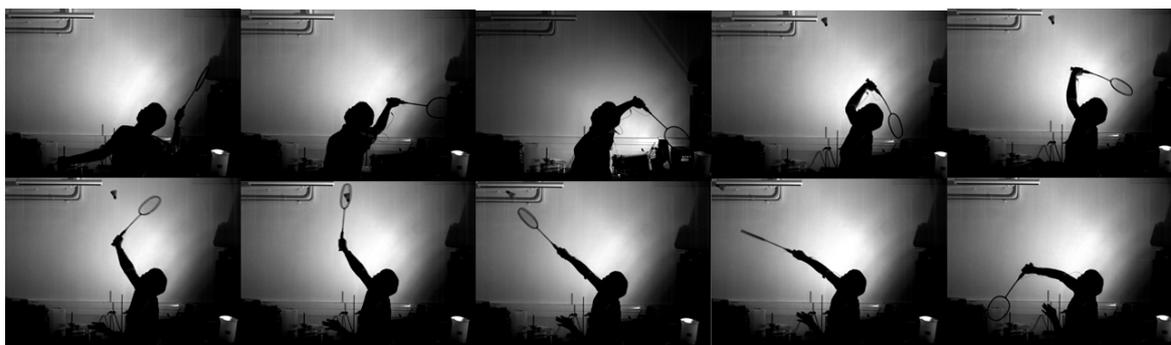


FIGURE 6.6 – Frappe en badminton : phase d'armement (image 1-3) ; phase d'accélération (image 4-6) ; contact (image 7) ; phase d'accompagnement (image 8-10)

Pendant la frappe, les forces inertielles générées par les fortes accélérations provoquent une modification de la tige (figure 6.7). La raquette est propulsée rapidement vers l'avant, la tige se défléchit en arrière puis revient vers l'avant afin de reprendre sa forme initiale. C'est à ce moment là que l'impact se produit entre la raquette et le volant. La déformation permet de fournir une vitesse supplémentaire à la raquette lors de l'impact, et influence le moment de contact et la dynamique de la raquette pendant la frappe. Ainsi, la dynamique d'une raquette comprend un mouvement déformable suivi d'un mouvement de rigidité [Kwan et Rasmussen, 2011].



FIGURE 6.7 – Déflexion “négative” de la raquette lors de la phase d’accélération du mouvement

## 6.2 La déflexion de la raquette avec un vérin

Lors d’un smash, plusieurs facteurs sont mis en avant comme les mouvements multiples du bras. Pour renforcer notre étude sur la déflexion lors d’un smash, il nous a semblé important d’observer le phénomène. Afin de simplifier au maximum notre analyse, nous tenterons de jouer que sur une seule dimension. De plus, la linéarité entre la vitesse de la raquette et du volant renforce l’idée que pour envoyer un volant encore plus vite, il faut influencer sur la vitesse de la raquette.

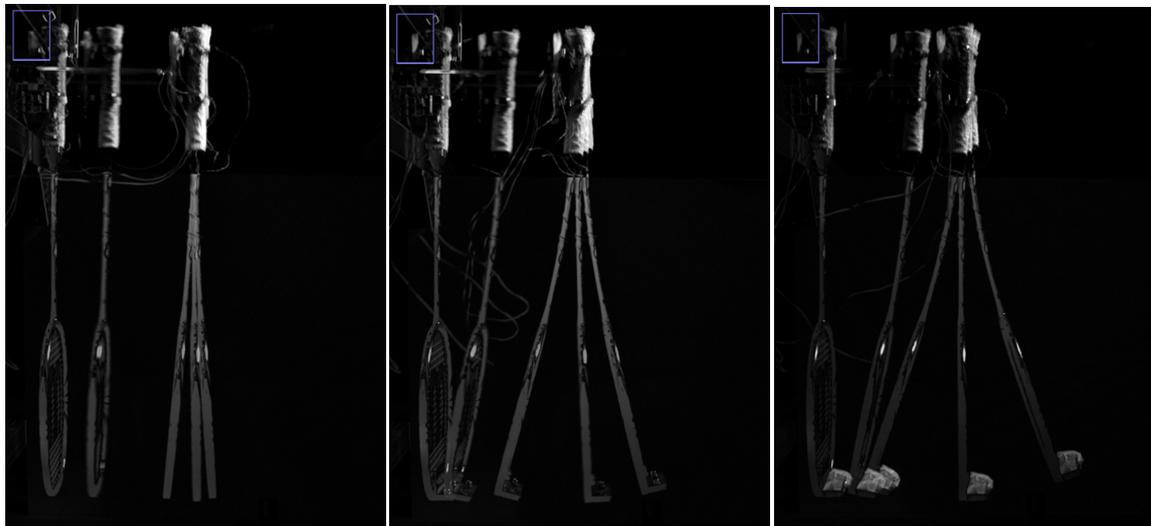
### 6.2.1 Objectif

Au cours de notre précédente expérimentation, nous avons pu voir que la déflexion ajoutait une vitesse supplémentaire à la raquette. Aussi, l’objectif de cette étude est d’observer la possibilité d’augmenter la déflexion afin d’accroître la vitesse de sortie du volant. L’accélération semble être un des facteurs d’augmentation de l’élasticité de la raquette, mais il est aussi possible de jouer sur la répartition des masses [Kwan et Rasmussen, 2011]. Nous nous sommes concentrées essentiellement sur la dynamique de la raquette.

### 6.2.2 Protocole expérimental

Pour mieux comprendre et analyser la déflexion de raquette, nous avons mis en place un dispositif expérimental présenté sur la figure 6.8. Une raquette de badminton

identique à celle utilisée par le joueur (Wilson Draco BLX ; 86g ; 675 mm) est fixée sur un vérin au niveau du manche (PowerRod PRA 2510) capable d'accélérer jusqu'à 50 m/s<sup>2</sup> sur une distance de 22 cm. La raquette est alors soumise à une vitesse maximale (3 m/s) sur 11 cm en un temps  $\tau$  variant entre 60 et 700 ms, puis soumise à une décélération sur le même temps. Au cours de l'expérimentation, les accélérations étaient identiques (40 m/s<sup>2</sup>) sur une même distance de 22 cm. Pour mesurer la dynamique de la raquette et la déflexion de la tige, une caméra à haute vitesse enregistrait de côté (1000 fps). Au cours de cette expérimentation, l'augmentation de la déflexion nous semblait importante pour accroître la vitesse de la raquette.



(a) Chronophotographie de la raquette

(b) Chronophotographie de la raquette avec une masse  $m = 88$  g

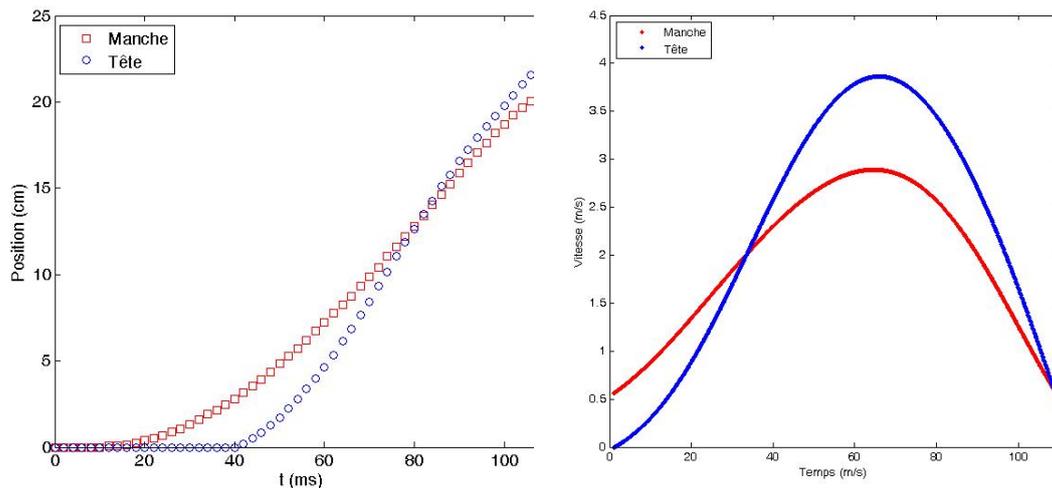
(c) Chronophotographie de la raquette avec une masse  $m = 176$  g

FIGURE 6.8 – Accélération du manche de la raquette avec un vérin avec ou sans masse sur la raquette

Pour amplifier la déflexion, la tête de raquette a été lestée avec une masse égale et à deux fois sa masse ( $m_1 = 88$  g et  $m_2 = 176$  g). Cependant, cela a pour influence de modifier la pulsation propre de la raquette ( $\omega_0$ ). Donc pour mesurer la pulsation propre à chaque raquette, celle-ci était fixée au niveau du manche. Une force était exercée sur la tête de raquette la faisant vibrer et une jauge de contrainte mesurait la pulsation d'oscillation. Ainsi, nous obtenions la pulsation propre pour la raquette ( $\omega_0 = 84.0$  rad/s), celle pour la raquette lestée à 88 g ( $\omega_0 = 36.6$  rad/s) et celle pour la raquette lestée à 176 g ( $\omega_0 = 27.6$  rad/s).

### 6.2.3 Résultats expérimentaux

Au cours de l'expérimentation, les mêmes paramètres sont conservés quelque soit la raquette. Le manche parcourt une distance de  $\Delta = 22$  cm en  $\tau = 75$  ms, avec une accélération de  $\alpha = 40$  m/s<sup>2</sup>, à une pulsation  $\omega = 42$  rad/s et une vitesse maximale de  $v = 3$  m/s. Lors d'une accélération, dans le cas où la raquette est totalement rigide comme au tennis, la vitesse du manche serait identique à la vitesse de la tête de raquette. L'accélération liée à l'élasticité de la raquette génère une déflexion de la tige de raquette, qui désynchronise le déplacement de la tête de raquette. Les figures 6.9a, 6.10a et 6.11a montrent que la tête de raquette met un certain temps à se déplacer alors que le manche se déplace dès le début. Cela met en évidence la place de l'accélération dans la production de la déflexion de raquette.



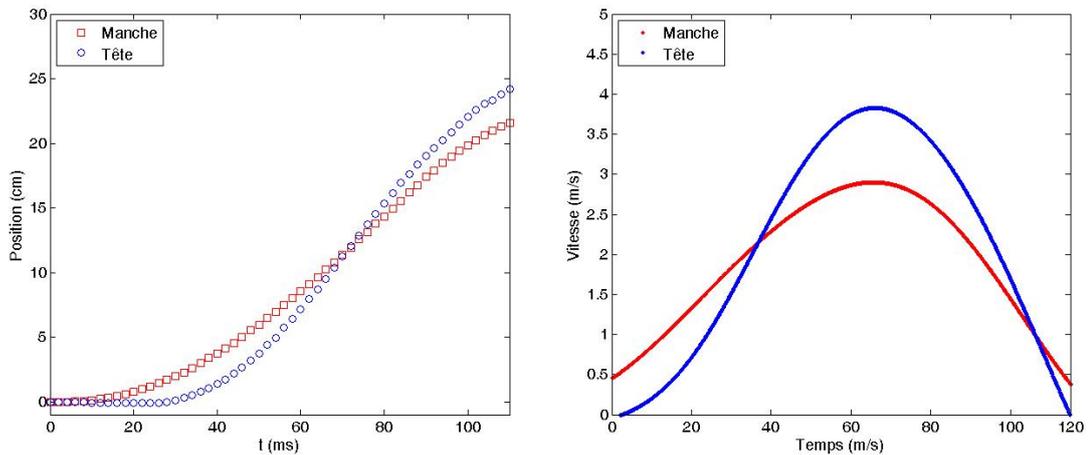
(a) Position de la raquette au cours du temps (b) Vitesse de la raquette au cours du temps

FIGURE 6.9 – Dynamique de la raquette lors de l'expérience avec le vérin

Lorsque la raquette atteint sa déflexion “maximale” liée à l'accélération, la tige de raquette ne peut stocker davantage d'énergie élastique, elle arrive à “saturation”. Une raquette a des propriétés élastiques qui lui sont propres et qui dépendent des matériaux qui la composent. Dans le cas où la raquette subit une énorme accélération, elle ne défléchira davantage qu'en fonction de ses propriétés élastiques. De plus, une absence d'accélération maintient la déflexion obtenue au début de l'accélération. À l'inverse, une décélération entraîne un déploiement vers l'avant de la tête de raquette, permettant ainsi d'augmenter la vitesse.

La figure 6.9 analyse la vitesse de la dynamique de la raquette en fonction du temps. La pulsation liée au vérin est  $\omega = 42$  rad/s et la fréquence propre de la raquette est de  $\omega_0 = 84$  rad/s. Le rapport des pulsations est  $\omega/\omega_0 = 0.50$  et le rapport des vitesses maximales obtenues équivaut à  $v_{tête}/v_{main} = 1.4$ . Ainsi, pour que le joueur utilise au maximum la déflexion, sa phase d'accélération doit être proche de 50 ms. Expérimentalement avec le vérin, nous obtenons des valeurs comprises entre 50 et 60 ms et un gain de vitesse lié à la déflexion de l'ordre de 1.4 (+40 %).

Une expérimentation semblable est ensuite menée avec une raquette lestée (figure 6.10). La modification de la pulsation propre de la raquette est de  $\omega_0 = 36.6$  rad/s. Le rapport des pulsations est  $\omega/\omega_0 = 1.15$  et le rapport des vitesses maximales équivaut à  $v_{tête}/v_{main} = 1.67$ . L'augmentation de l'élasticité de la raquette nécessite un temps optimal plus important pour générer une déflexion comprise entre 110 et 115 ms soit le double du temps pour obtenir un gain de vitesse lié à la déflexion de l'ordre de 1.7 (+70 %).



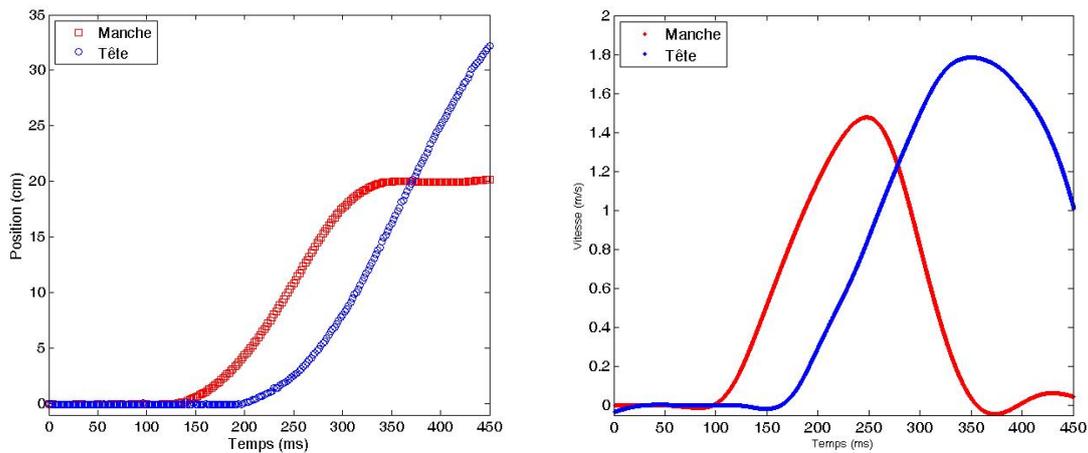
(a) Position de la raquette au cours du temps (b) Vitesse de la raquette au cours du temps

FIGURE 6.10 – Dynamique de la raquette lors de l'expérience avec le vérin avec une masse de  $m = 88$  g

En augmentant davantage la déflexion, la figure 6.11 met en exergue les propriétés de la raquette lestée de  $m = 167$  g. L'augmentation de la masse modifie la pulsation propre de la raquette diminue à  $\omega_0 = 27.6$  rad/s. Le rapport des pulsations est  $\omega/\omega_0 =$

1.52 et le rapport des vitesses maximales équivaut à  $v_{raquette}/v_{main} = 1.3$ . L'augmentation de la masse modifie le temps nécessaire pour atteindre le temps optimal de la déflexion (130 ms). Cependant, le ratio de vitesse  $v_{tête}/v_{main} = 1.3$  diminue. Le fait d'augmenter la déflexion de la raquette a diminué la vitesse de la tête de raquette. La tige ne peut emmagasiner davantage d'énergie puis la restituer. À ce moment, nous pouvons penser que la raquette est en "saturation".

Ainsi, à partir de cette expérimentation, nous avons pu voir que la déflexion obtenue sans masse n'est pas encore la déflexion maximale que peut atteindre la raquette de badminton. De plus, nous avons pu observer la "saturation" de l'élasticité de la tige. Il existe ainsi une déflexion optimale s'approchant d'un ratio de 1.7 avec une augmentation de la masse de 88 g. S'écartant de cette valeur, la performance ne sera que dégradée même si la déflexion de la raquette est plus importante.



(a) Position de la raquette au cours du temps (b) Vitesse de la raquette au cours du temps

FIGURE 6.11 – Dynamique de la raquette lors de l'expérience avec le vérin avec une masse de  $m = 176$  g

La vitesse maximum obtenue à la tête de raquette est plus grande quand la déflexion est plus importante. Cependant, l'augmentation de la déflexion amène une modification du temps optimal de frappe pour optimiser la restitution de l'élasticité de la raquette. Pour compléter les observations précédentes, la figure 6.12 présente les rapports de vitesse du manche et de la tête de raquette. Ils sont établis en fonction du rapport  $\omega/\omega_0$ , où  $\omega_0$  est où la pulsation propre de la raquette utilisée et  $\omega = \pi/\tau$  où  $\tau$  est le temps

que met le manche de sa vitesse nulle à sa vitesse maximale.

Le rapport des vitesses est égal à 1 pour les pulsations faibles, dues à l'absence de déflexion. Par la suite, le rapport des vitesses augmente lorsque les pulsations sont comprises entre 0.4 à 1.2, puis diminue lorsque les pulsations deviennent trop importantes. Le meilleur rapport des vitesses est obtenu quand  $v_{tête}/v_{manche} = 1.67$  pour une pulsation propre proche de  $\omega = 1.15\omega_0$ .

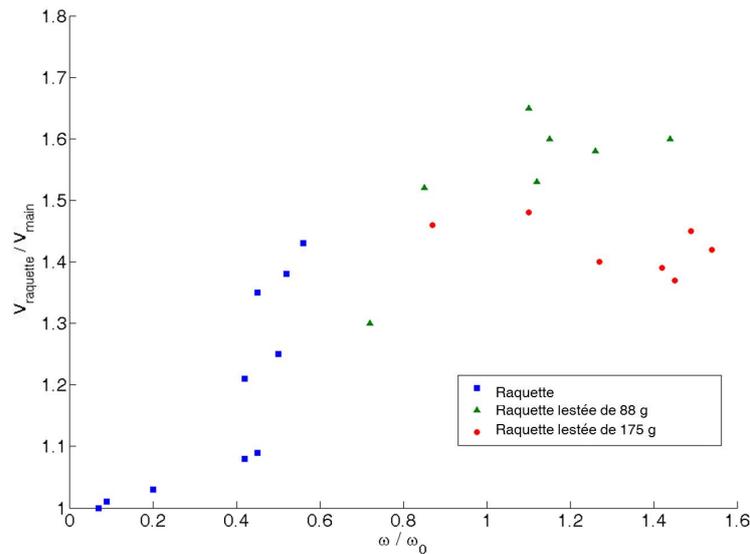


FIGURE 6.12 – Evolution des différents rapports des vitesses maximales avec le rapport  $\omega/\omega_0$ , où  $\omega_0$  est la pulsation propre de la raquette et  $\omega = \pi/\tau$  est la pulsation de la vitesse avec un vérin

## 6.3 Modélisation de la déflexion de la raquette

### 6.3.1 Théoriquement, du modèle ...

Pour comprendre ce phénomène de déflexion, nous avons modélisé une raquette simplifiée avec une raideur ( $k$ ) et une masse ( $m = 86$  g). La seconde loi de Newton prédit le ratio de vitesse ( $v_{raquette}/v_{main}$ ) en fonction du ratio de pulsation de la raquette ( $\omega/\omega_0$ ) :

$$\frac{v_{raquette}}{v_{main}} = \frac{1}{1 - \omega/\omega_0} \cdot \sin \frac{\omega/\omega_0}{1 + \omega/\omega_0} \quad (6.1)$$

L'équation 6.1 est tracée sur la figure 6.13 et prédit que le ratio optimal de la

plus grande vitesse de raquette est de 1.8, obtenu par soit  $\omega = 10^{0.2}$ , soit précisément  $\omega = 0.6\omega_0$  ( $\approx 60$  ms).

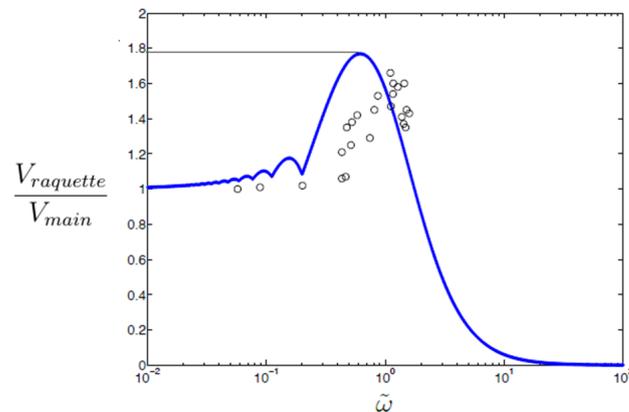


FIGURE 6.13 – Prédiction des vitesses maximales en fonction de la pulsation selon [Cohen, 2015]

### 6.3.2 ... à la pratique

Lors de l'une de nos expérimentations précédentes, nous avons pu analyser le smash d'un expert. Le rapport des vitesses maximales entre la main et la tête de la raquette était de  $v_{tête}/v_{main} = 1.4$ . Nous avons pu obtenir le rapport des pulsations comme étant  $\omega/\omega_0 = 0.50$ , soit une phase d'accélération d'environ 50 ms. L'expérience du vélin nous a montré que la raquette sans masse met environ 50 à 60 ms pour obtenir un gain grâce à une déflexion de l'ordre de 1.4 (soit +40 %).

L'augmentation de la masse de la tête de raquette a permis d'augmenter l'élasticité de la raquette. La déflexion restitue ainsi davantage de vitesse. Cependant, une augmentation trop importante de la déflexion nuit à la restitution d'énergie. A partir de l'équation 6.1, il est possible d'obtenir théoriquement un ratio de 1.8 entre  $v_{raquette}/v_{main}$  avec une phase d'accélération comprise entre 50 et 60 ms.

La phase d'accélération chez un joueur expert est d'environ 60 ms, correspondant à un ratio de pulsation  $\omega/\omega_0 = 0.62$ . Cette valeur est extrêmement proche de la valeur optimale prédite par le modèle. Ainsi, il serait totalement envisageable que le joueur de badminton puisse, par une modification des propriétés de la raquette, augmenter sa performance et s'approcher de la valeur théorique proche d'un ratio de 1.8 comme le

suggère l'équation 6.1.

## 6.4 Prédiction de la vitesse du volant : un modèle physique validé par l'expérimentation

### 6.4.1 L'importance de la déflexion de raquette durant un smash

Précédemment, nous avons pu observer la part importante de la longueur de la raquette dans l'augmentation de la vitesse de celle-ci. En comparant le tennis et le badminton, on constate que les longueurs de raquette sont assez proches (longueur  $\approx 68$  cm). Cependant, la vitesse fournie par chaque raquette est différente.

Le design des raquettes passe par des choix des industriels et par des expériences d'entraîneurs. Chaque joueur selon son niveau, son style de jeu, aura une préférence pour la composition de la raquette : plus ou moins de raideurs de tige et une répartition différentes des masses [Kwan et Rasmussen, 2011] (figure 6.14). D'un point de vue scientifique, il est difficile mesurer les retours proprioceptifs, liés seulement aux ressentis des joueurs et aux idées des entraîneurs. De plus, la relation entre la raquette et le joueur a été très peu observée.

En observant de plus près la raquette de badminton, l'une de ses particularités est son élasticité au niveau de la tige. En effet, en la comparant avec la raquette de tennis, on peut observer que la raquette de badminton a des propriétés élastiques plus importantes. Cohen [2015] a identifié la raideur de ces raquettes. En faisant vibrer la raquette de tennis à une certaine fréquence ( $f_0 \approx 140$  Hz), elle a pu obtenir la raideur ( $k \approx 220$  N/m). Faisant de même pour la raquette de badminton, elle a obtenu des valeurs de raideur moins importantes ( $f_0 \approx 15$  Hz et  $k \approx 7.5$  N/m).

#### 6.4.1.1 Objectif

Les joueurs experts en badminton sont caractérisés par leur habileté à générer de grandes vitesses de volants. Pour les aider, une bonne raquette est productrice de grande vitesse de projectile pour une faible énergie dépensée ou produite lors d'une

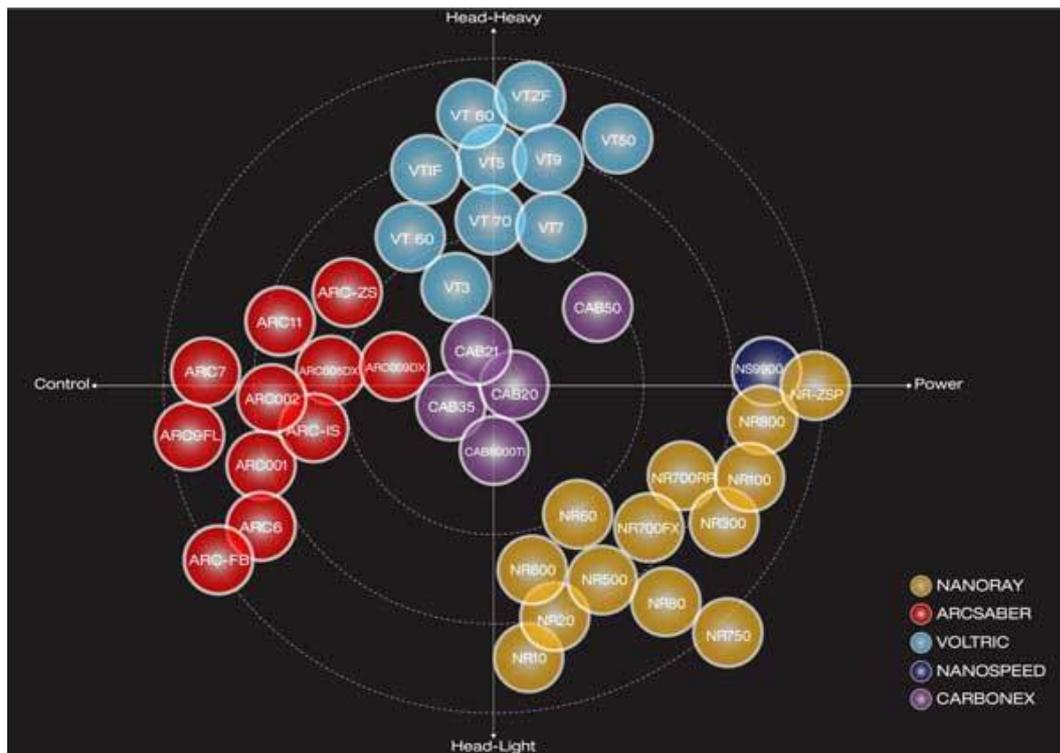


FIGURE 6.14 – Exemple de différentes raquettes selon des caractéristiques multiples



(a) Déflexion durant un smash



(b) Déflexion durant une interception



(c) Déflexion durant un revers

FIGURE 6.15 – Déflexion de la raquette

situation de jeu particulière. De plus, nous savons déjà que la raquette de badminton est soumise à des accélérations au niveau du manche entraînant une modification de son état initial : la déflexion qui permet d'augmenter la vitesse de la raquette.

Cependant, aucune étude n'a montré jusque là son utilité, sa particularité et n'a tenté de modéliser et d'optimiser cette déflexion. À partir de ce constat, il nous a semblé primordial d'analyser le comportement d'une raquette lors d'un smash en badminton avec et sans déflexion.

#### 6.4.1.2 Protocole expérimental

Pour analyser et comprendre la déflexion, nous avons demandé à un joueur expert de l'activité de participer à cette étude (tableau 7.4). L'athlète était physiquement en bonne santé et n'a signalé aucune blessure durant tout le temps de l'étude.

#### 6.4.1.3 Design de l'expérimentation

Après un échauffement général de 15 minutes, le participant était invité à réaliser plusieurs smashes avec l'équipement proposé. Cette phase de familiarisation permet au joueur de pouvoir s'approprier la raquette (Wilson Draco BLX; 86g; 675 mm). Le joueur avait comme instruction de smasher le plus fort possible un volant accroché au plafond. Chaque frappe était entrecoupée de 30 secondes de récupération. Au total, le joueur a frappé 50 fois le volant à des vitesses différentes.

Un nombre de 10 frappes était proposé pour des vitesses très lentes, lentes, moyennes, rapides et très rapides. Pour aider le joueur, la consigne était de faire un amorti pour les frappes très lentes, un amorti rapide pour les frappes lentes, un dégagement pour les frappes moyennes, un dégagement offensif pour les frappes rapides et un smash pour les frappes très rapides.

#### 6.4.1.4 Recueil des données

Le dispositif expérimental consistait en 9 caméras de capture de mouvement (Vicon V8i), à une fréquence d'enregistrement de 500 Hz avec une précision de 0.2 mm (Vicon Peak, Oxford, Royaume-Unis). La raquette utilisée durant l'expérimentation était équipée de plusieurs marqueurs selon le modèle de [Kwan et al. \[2008a\]](#). Ils étaient placés sur (a) le bas et le haut du manche, (b) sur la tige de raquette, et (c) sur la tête de raquette (haut, bas, gauche et droite) (figure 6.16).

Au cours de la capture du mouvement, l'axe  $x$  a été défini comme étant l'axe antéro-postérieur, l'axe latéral  $y$  et l'axe vertical  $z$ , où le plan  $xy$  étant identique à celui d'un terrain de badminton. L'orientation de l'humérus, du radius, de l'ulna et des segments de la main ont été déterminées comme étant l'axe  $x$  perpendiculaire antéro-postérieur, l'axe médio-latéral  $y$  et l'axe longitudinal  $z$  selon la description de [Wu et al. \[2005\]](#).



FIGURE 6.16 – Raquette de badminton, équipée de marqueurs réfléchissants

L'angle durant la flexion du coude était déterminé selon l'axe longitudinal des segments proximaux et distaux.

#### 6.4.1.5 Obtenir une raquette rigide avec une raquette flexible

Pour créer notre raquette rigide, nous avons créé un marqueur virtuel en utilisant les deux marqueurs au niveau du manche. Le nouveau marqueur est à la même position que le marqueur en tête de manche quand la raquette ne défléchit pas, mais ne défléchit pas lorsque le manche de la raquette accélère, permettant ainsi de créer une raquette virtuelle rigide. Le nouveau marqueur et les calculs des différentes vitesses ont été réalisés à l'aide du logiciel Matlab R13a (The Math Works Inc, Natick, MA, USA). Pour connaître la déflexion de la raquette, nous calculions la distance entre le marqueur virtuel et le marqueur réel de la tête de raquette.

### 6.4.2 Résultats expérimentaux

#### 6.4.2.1 La déflexion de la raquette lors du smash

Dans cette étude, nous cherchons à comprendre l'importance de l'élasticité de la raquette lors d'un smash chez un joueur de badminton. Pour avoir une idée de la déflexion de la raquette, la figure 6.7 présente la superposition de plusieurs photos lors d'un smash. Le joueur accélère sa main, influençant la vitesse du manche vers l'avant. On peut observer que la raquette ne se déplace pas directement. On parle ici de déflexion "négative" lorsque la raquette se défléchit vers l'arrière, et de déflexion "positive" lorsque celle-ci se défléchit vers l'avant. On observe que la tige se tord pour atteindre une déflexion maximale mesurée à  $\approx 17$  cm. Par la suite, la raquette se déplie vers l'avant afin de retrouver son état initial qui permettra d'obtenir la vitesse maximale

lorsque cette dernière retrouvera la verticale. C'est le moment optimal pour frapper le volant puisque la raquette ajoute vitesse liée à la composante élastique lors du retour de la déflexion (fouetté) de la tête de raquette.

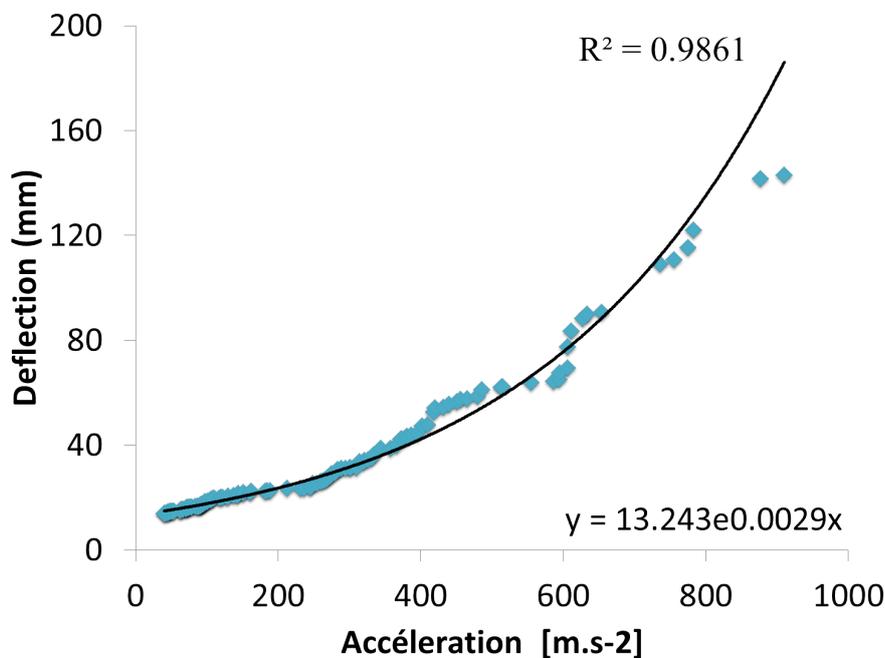
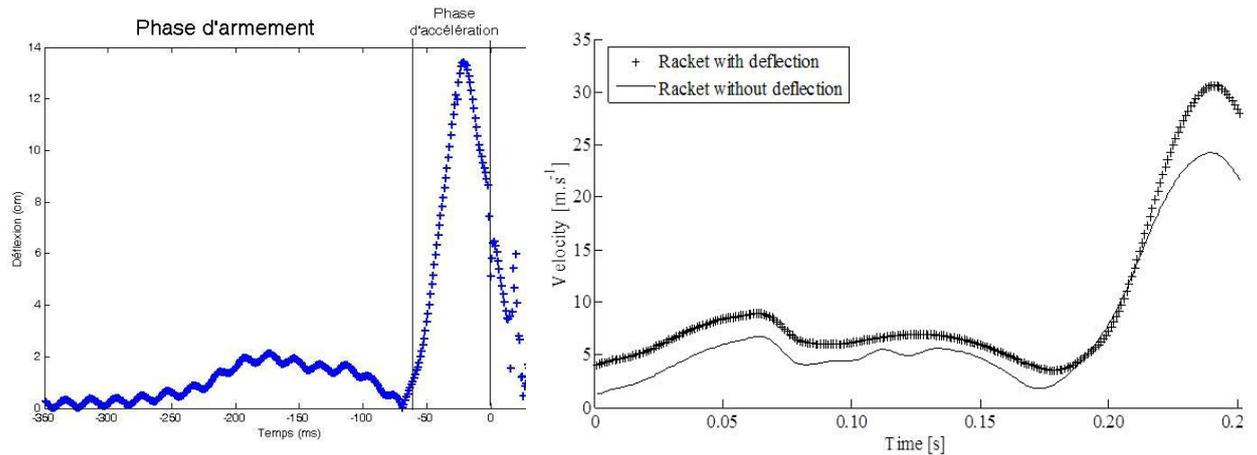


FIGURE 6.17 – Déflexion de la raquette en fonction de l'accélération de la main

Dans cette expérience, le joueur devait smasher à des vitesses différentes pour analyser la déflexion selon les différentes accélérations. On observe que la déflexion est fortement corrélée à l'accélération de la main que produit le joueur au niveau du manche.

La figure 6.18a montre la déflexion en cm entre le marqueur réel et le marqueur virtuel. Au cours de la frappe, il existe plusieurs phases que nous avons décrites précédemment sur la figure 6.6. L'origine du temps est le moment d'impact entre le volant et la raquette. Durant la phase d'armement ( $-350 \text{ ms} \leq t \leq -60 \text{ ms}$ ), lorsque le joueur amène la raquette derrière son dos, puis descend la tête de raquette vers le bas, on peut observer une première déflexion positive d'amplitude ( $\approx 2.5 \text{ cm}$ ). Lors de la phase d'accélération, la raquette part vers l'avant pour aller frapper le volant ( $-60 \text{ ms} \leq t \leq 0 \text{ ms}$ ). À ce moment là, une déflexion négative a lieu, avec une amplitude de 17 cm à  $t = -30 \text{ ms}$ . Puis la tête de raquette se déplie pour retrouver son état initial pendant que la raquette continue d'avancer vers le volant.



(a) Distance au cours des différentes phases entre le marqueur virtuel et réel (b) Comparaison de vitesse entre la raquette flexible et rigide

FIGURE 6.18 – Influence de la déflexion sur la raquette

Lors de l'impact avec le volant, la raquette n'a pas encore repris sa position initiale. Cela signifie que le joueur ne tire pas totalement avantage de l'énergie élastique disponible dans la tige de raquette. Pour optimiser la frappe, le joueur devrait impacter le volant lorsque la raquette atteint son maximum de vitesse, amenant ainsi un maximum de renvoi d'énergie élastique. Par cette synchronisation, le joueur pourrait augmenter davantage la vitesse du volant.

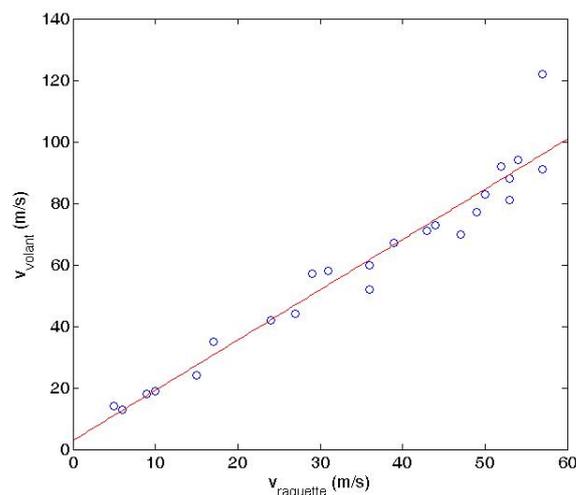


FIGURE 6.19 – Évolution de la vitesse du volant  $v_{volant}$  en fonction de la vitesse de la raquette  $v_{raquette}$

La figure 6.18b met en avant le gain de vitesse obtenu par la déflexion. Lorsque le joueur frappe le volant avec sa raquette ( $v_{flexible} \approx 32$  m/s), la vitesse est plus importante qu'avec une raquette rigide ( $v_{rigide} \approx 24$  m/s), soit un gain de vitesse de +25

% grâce à la déflexion. Ainsi, la vitesse de la raquette influence la vitesse de sortie du volant. La figure 6.19 met en exergue la vitesse de sortie du volant lors de l'impact avec la vitesse de la raquette durant l'expérience. Les points s'alignent sur une droite de pente 1.6, signifiant que le rapport des différentes vitesses est constant et que le ratio  $v_{volant}/v_{raquette} \approx 1.6$ .

Dans cette expérience, l'analyse de la vitesse de la raquette (avec la composante élastique) avec celle de la raquette rigide était primordiale dans la compréhension de la déflexion. Toutefois, les mesures prennent également en compte un mouvement complexe lors de la frappe en badminton qui utilise plusieurs articulations (épaule, coude et poignet). De plus, le rapport des vitesses, équivalant à 1.6, est linéairement relié entre la vitesse de la raquette et la vitesse du volant.

Au cours de cette expérimentation, nous avons pu observer que la déflexion permettait d'augmenter considérablement la vitesse de la raquette. Cependant, les nombreux mouvements de rotation liés au bras lors du smash peuvent nuire à l'interprétation de nos résultats. Pour résoudre ce problème et avoir une meilleure compréhension de la déflexion, nous avons réalisé une expérience simplifiée.

## 6.5 Références

- BRODY, H. (1995). How would a physicist design a tennis racket? *Physics Today*, 48:26–31. 187
- BRODY, H. (1997). The physics of tennis III. The ball racket interaction. *American Journal of Physics*, 65:26–31. 187
- BRODY, H. (2000). Player sensitivity to the moments of inertia of a tennis racket. *Sports Engineering*, 3:145–148. 187
- COHEN, C. (2015). *La physique du sport*. Thèse de doctorat. 196, 197, VI
- COHEN, C., DARBOIS-TEXIER, B., BRUNEL, E., QUÉRÉ, D. et CLANET, C. (2014). The aerodynamic wall. *Proceedings of the Royal Society*, 470:1–20. 189

- CROSS, R. (1998). The sweet spots of a tennis racket. *Sports Engineering*, 1:63–78. 187
- CROSS, R. (2001). Customizing a tennis racket by adding weights. *Sports Engineering*, 4:1–14. 187, 188
- CROSS, R. (2006). Effects of swing-weight on swing speed and racket power. *Journal of Sports Sciences*, 24:23–30. 187, 188
- FLEISIG, G. S., ZHENG, N., STODDEN, D. F. et ANDREWS, J. R. (2009). Relationship between bat mass properties and bat velocity. *Sports Engineering*, 5:1–14. 187, 188
- GUILLAIN, J. Y. (2002). *Histoire du badminton : du jeu de volant au sport olympique*. Publibook édition. 185, 186
- JAITNER, T. et WOLF, G. (2007). Analysis of badminton smash with a mobile measure device based on accelerometry. In *XXV ISBA Symposium vol 20*, pages 282–284. 189
- KWAN, M., CHENG, C. L., TANG, W. T. et RASMUSSEN, J. (2010a). Measurement of badminton racket deflection during a stroke. *Sports Engineering*, 12(3):143–153. 188, 189
- KWAN, M., de ZEE, M. et RASMUSSEN, J. (2008a). Dynamic effects of badminton racket compliance. *Journal of Biomechanics*, 41(1):88. 187, 188, 189, 199
- KWAN, M. et RASMUSSEN, J. (2011). Linking badminton racket design and performance through motion capture. *Computer Aided Medical Engineering*, 2(1):13–18. 186, 187, 188, 189, 190, 197
- KWAN, M., SKIPPER ANDERSEN, M., CHENG, C. L., TANG, W. T. et RASMUSSEN, J. (2010b). Investigation of high-speed badminton racket kinematics by motion capture. *Sports Engineering*, 13(2):57–63. 188, 189
- KWAN, M., SKIPPER ANDERSEN, M., ZEE, M. et RASMUSSEN, J. (2008b). Dynamic Model of a Badminton Stroke (P254). In *The Engineering of Sport 7 SE - 69*, pages 563–571. Springer Paris. 187, 188, 189

- LAFFAYE, G., PHOMSOPHA, M. et DOR, F. (2015). Changes in the game characteristics of a badminton match : a longitudinal study through the Olympic Game finals analysis in men's singles. *Journal of Sports Science and Medicine*, 14:584–590. 186
- MILNE, R. D. et DAVIS, J. P. (1992). The role of the shaft in the golf swing. *Journal of Biomechanics*, 25:975–983. 187
- MITCHELL, S. R., JONES, R. et KING, M. (2000). Head speed vs racket inertia in the tennis serve. *Sports Engineering*, 3:99–110. 188
- MONTAGNY, J. (2003). Transient behaviour of flexible structures. Application to badminton rackets. *Mécanique and Industries*, 4(2):113–118. 188
- NATHAN, A. M. (1992). Characterising the performance of baseball bats. *American Journal of Physiology*, 71:134–143. 187, 188
- RASMUSSEN, J., KWAN, M., SKIPPER ANDERSEN, M. et de ZEE, M. (2010). Analysis of segment energy transfer using musculoskeletal models in a high speed badminton stroke. In *Proceedings of the 9th International Symposium on Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, pages 1–6. 189
- SINGH, G. et YOGESH (2010). Technology and badminton. *British Journal of Sports Medicine*, 44(Suppl 1):i51. 188
- SMITH, L., BROKER, J. et NATHAN, A. (2003). *A study of softball player swing speed*. Melbourne, VIC : RMIT University, sports dynamics : discovery and application édition. 187, 188
- SWEETING, R. L. et WILSON, J. S. (1992). *Badminton : Basic skills and drills*. Mountain View, CA : Mayfield Publishing Company. 186
- WOROBETS, J. T. et STEFANYSHYN, D. J. (2007). Shaft stiffness significantly influences golf clubhead speed at impact. In *Journal of Biomechanics, 40, Supplement 2, Program and Abstracts of the XXI International Society of Biomechanics Congress*, page S279. 187
- WU, G., van der HELM, F. C. T., VEEGER, H. E. J., MAKHSOUS, M., van ROY, P., ANGLIN, C., NAGELS, J., KARDUNA, A. R., MCQUADE, K., WANG, X., WERNER,

F. W. et BUCHHOLZ, B. (2005). ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion—Part II : shoulder, elbow, wrist and hand. *Journal of Biomechanics*, 38(5):981–992. [199](#)





# Chapitre 7

## Influence du bras et de son mouvement dans la production de vitesse

■ *La paresse s'empare de tout  
prétexte pour se croiser les bras* ■

---

Henri Frédéric Amiel

### Sommaire

---

<b>7.1</b>	<b>L'analyse cinématique et biomécanique durant un smash</b>	<b>213</b>
7.1.1	Analyse cinématique de la frappe en badminton . . . . .	213
<b>7.2</b>	<b>Le bras de levier</b> . . . . .	<b>221</b>
7.2.1	Objectif . . . . .	222
7.2.2	Le bras de levier . . . . .	222
7.2.3	Protocole expérimental . . . . .	223
7.2.4	Résultat expérimental . . . . .	225
<b>7.3</b>	<b>Extension ou pronation de l'avant-bras, laquelle produit la plus grande vitesse ?</b> . . . . .	<b>227</b>
7.3.1	Objectif . . . . .	227
7.3.2	Protocole expérimental . . . . .	227
7.3.3	Résultats expérimentaux . . . . .	231
7.3.4	Discussion . . . . .	234
7.3.5	L'extension de l'avant-bras ou la pronation radio-ulnaire ? . .	235

7.3.6 Discriminer selon le mouvement . . . . .	235
7.3.7 Conclusion . . . . .	238
<b>7.4 Références . . . . .</b>	<b>238</b>

---

*Ce travail a été réalisé avec la collaboration de Jean Jouvrey*





## 7.1 L'analyse cinématique et biomécanique durant un smash

Les études sur l'analyse cinématique en badminton ont été très peu explorées. Les recherches se sont orientées plutôt sur les techniques d'apprentissages, sur les tests de performances, sur les différents aspects physiologiques et psychologiques de la performance. La littérature scientifique a réalisé de nombreuses analyses sur le mouvement de frappe du joueur [Gowitzke et Waddell, 1977, 1979a,b,c, 1980; Waddell et Gowitzke, 1977, 1979]. Elle a montré que la coordination inter-segmentale est extrêmement complexe en badminton et que les mouvements nécessitent énormément d'énergie [Bird *et al.*, 1991]. Le badminton exige des sauts, des fentes et de rapides changements de direction, principalement lors des phases de reprises d'appuis ("stop-and-go") [Bowyer, 2010; Hensley et Paup, 1979; Kroner *et al.*, 1990] ainsi que des mouvements rapides du bras à partir de différentes postures [Hong *et al.*, 2014; Shariff *et al.*, 2009]. L'ensemble des analyses biomécaniques a été souvent capturé à l'aide de caméras à haute vitesse [Hsueh *et al.*, 2012; Tang *et al.*, 1995; Wei, 2000] ou d'autres instruments scientifiques [Tang *et al.*, 1995; Teu *et al.*, 2005; Wei, 2000] permettant de recueillir en détails les éléments composant la performance en badminton.

### 7.1.1 Analyse cinématique de la frappe en badminton

L'analyse cinématique des différentes frappes en badminton a été fortement étudiée. La littérature scientifique cherche avant tout à conceptualiser les frappes puissantes tel que le dégagement, mais plus particulièrement le smash. L'étude par électromyographie du muscle (EMG) montre que certaines frappes ont un pattern moteur similaire. Le smash et le dégagement présentent des similitudes importantes alors que l'amorti se différencie [Tsai *et al.*, 2000]. Cela est dû à la nécessité de fournir une grande vitesse d'exécution lors de la frappe du smash et du dégagement.

Un principe émerge et révèle l'importance de la chaîne proximo-distale lors d'une frappe en badminton. Il est important de souligner que lors d'un smash en extension, l'activité EMG est plus importante sur les membres supérieurs que lors d'un smash [Tsai *et al.*, 2005]. Le smash en extension permet d'augmenter la vitesse du volant lors

de l'impact (+3 %) (tableau 7.1).

Étude	Frappe	Sujet ( <i>n</i> )	Vitesse volant (m/s)	Angle volant (°)	Hauteur contact (cm)
Masculin					
[Jaitner et Wolf, 2007]	Smash extension	Elite (4)	65.0 (3.3)	20.3 (4.4)	288.0 (9.0)
Tsai et al. [1998]	Smash extension	Elite (7)	67.9 (NS)	-13.5 (NS)	278.0 (NS)
Lee [1993]	Smash extension	Expert (NS)	62.7 (NS)	NS (NS)	NS (NS)
Tsai et al. [1998]	Smash extension	Scolaire (7)	56.5 (NS)	NS (NS)	NS (NS)
Rambely et al. [2005a]	Smash	Elite (12)	56.5 (NS)	NS (NS)	NS (NS)
Tsai et al. [1998]	Smash	Elite (7)	34.6 (6.3)	-7.43 (NS)	255.0 (NS)
Tsai et al. [2000]	Smash	Elite (1)	68.0 (NS)	-11.5 (NS)	NS (NS)
Lee [1993]	Smash	Expert (NS)	56.3 (NS)	NS (NS)	NS (NS)
Tsai et al. [1998]	Smash	Scolaire (7)	54.2 (NS)	-7.0 (NS)	243.0 (NS)
Tsai et al. [2000]	Dégagement	Expert (1)	64.0 (NS)	10.6 (NS)	NS (NS)
Hussain et al. [2011c]	Amorti	Elite (6)	61.9 (14.7)	NS (NS)	NS (NS)
Tsai et al. [2000]	Amorti	Expert (1)	29 (NS)	-4.5 (NS)	NS (NS)
Hussain et Arshad Bari [2011]	Smash coup droit	Expert (6)	67.0 (6.3)	3.8 (0.8)	2.4 (0.1)

Étude	Frappe	Sujet ( <i>n</i> )	Vitesse volant (m/s)	Angle volant (°)	Hauteur contact (cm)
Hussain et Arshad Bari [2011]	Smash revers	Expert (6)	52.7 (4.5)	3.8 (0.4)	2.2 (0.1)
Huang <i>et al.</i> [2002]	Smash revers	Junior (8)	52.1 (6.7)	-4.0 (3.7)	224.2 (7.8)
Huang <i>et al.</i> [2002]	Dégagement revers	Junior (8)	53.0 (3.2)	4.9 (4.2)	231.7 (10.5)
Huang <i>et al.</i> [2002]	Amorti revers	Junior (8)	25.2 (4.2)	22.1 (5.2)	211.2 (12.3)
Féminin					
Tsai <i>et al.</i> [2008]	Smash	Scolaire (7)	56.9 (3.7)	-4.3 (2.2)	NS (NS)
Tsai <i>et al.</i> [2008]	Dégagement	Scolaire (7)	57.8 (5.5)	15.2 (2.8)	NS (NS)
Tsai <i>et al.</i> [2008]	Amorti	Scolaire (7)	59.6 (3.7)	5.9 (4.6)	NS (NS)

Note : moyenne et (écart-type)

NS : non spécifié

TABLEAU 7.1 – Paramètres biomécaniques de joueurs de badminton

Pour produire une puissance suffisante lors des différentes frappes avec une dépense minimum d'énergie [Tsai *et al.*, 1998], les joueurs utilisent le principe d'adjonction des vitesses angulaires, avec l'utilisation de la séquence proximo-distale des articulations [Bird *et al.*, 1991; Gowitzke et Waddell, 1979a,b,c; Jackson et Tanner, 1993; Jaitner et Wolf, 2007; Lee, 1993; Lees, 2001, 2003; Rasmussen *et al.*, 2010; Sakurai et Ohtsuki, 2000; Waddell et Gowitzke, 2000]. Cependant, cela nécessite une coordination et une dissociation [Strohmeier *et al.*, 2009] de la force provenant du sol par les membres inférieurs [Rambely et Wan Abas, 2008; Rambely *et al.*, 2005b; Syamimi *et al.*, 2012], vers les membres supérieurs [Ariff et Rambely, 2008].

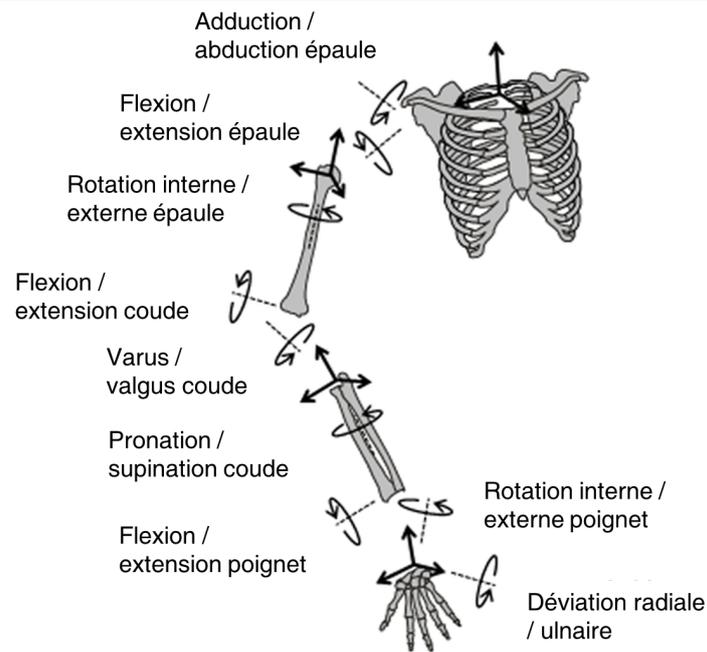


FIGURE 7.1 – Mouvements anatomiques du bras

Les mouvements anatomiques que nous utiliserons pour notre compréhension des mouvements du bras ont été schématisés sur la figure 7.1. La littérature scientifique décrit le geste d'une frappe (le smash), comme étant une rotation de la hanche et des articulations intervertébrales, inverse à celle du bassin. Elle est suivie d'une contre-rotation des articulations intervertébrales dans le sens inverse [Gowitzke et Waddell, 1977, 1979a,b,c; Niesner et Rantzmayer, 1982; Waddell et Gowitzke, 2000]. Le bras dominant (tenant la raquette) commence une rotation latérale de l'épaule vers la zone de frappe [Gowitzke et Waddell, 1979a,b,c; Gowitzke *et al.*, 1989; Hussain et Arshad Bari, 2011; van Cingel *et al.*, 2007; Waddell et Gowitzke, 1977, 2000]. Durant cette phase, le coude fléchit et une supination radio-ulnaire de l'avant bras a lieu [Gowitzke et Waddell, 1979a,b,c; Waddell et Gowitzke, 2000]. Une rotation médiale de l'épaule commence, suivie par celle du coude [Sakurai *et al.*, 1989; Seki, 1983] et de l'activation radio-ulnaire [Sakurai *et al.*, 1989] pour finir sur la production de la pronation radio-ulnaire [Gowitzke et Waddell, 1979a,b,c; Waddell et Gowitzke, 2000].

La rotation de l'avant-bras [Hussain et Arshad Bari, 2011; Poole, 1970; Rantzmayer, 1977] provient de la pronation lors d'un coup droit et de la supination lors d'un revers [Ariff et Rambely, 2008; Laffaye, 2013; Sakurai *et al.*, 1989; Teu *et al.*, 2005; Waddell et Gowitzke, 2000]. Il est important de souligner que les joueurs n'utilisent que très

rarement le “casser du poignet” comme il est courant de le penser [Gowitzke et Waddell, 1977, 1985; Poole, 1970; Waddell et Gowitzke, 1977]. Pour illustrer nos propos, la figure 7.2 montre une séquence proximo-distale de la frappe lors d’un dégagement en utilisant les principes énoncés précédemment.



FIGURE 7.2 – Séquence proximo-distal des différents segments lors d’une frappe

La combinaison entre la rotation au niveau de l’épaule et la pronation radio-ulnaire contribue à  $\approx 53\%$  de la vitesse finale lors d’un smash [Gowitzke et Waddell, 1977; Waddell et Gowitzke, 1977]. Cependant, l’ensemble des articulations du bras (poignet, coude et épaule) joue un rôle important dans l’exécution des différentes frappes réalisables en badminton [Hussain *et al.*, 2011a; Hussain et Arshad Bari, 2011]. Lors de la frappe, les muscles s’activent différemment. Tsai *et al.* [2006] décrivent l’activité musculaire lors d’un smash par l’initiation du deltoïde latéral lors du début de la frappe (-441.25 ms), suivie de l’activation du deltoïde antérieur (172.75 ms), puis celle du triceps (-77.63 ms) enfin l’extenseur du poignet se contracte (-43.50 ms) et le deltoïde postérieur est activé (-32.88 ms).

Etude	Frappe	Participant ( <i>n</i> )	Angle épaule (°)	Angle coude (°)	Angle poi- gnet (°)
Masculin					
Tsai <i>et al.</i> [2000]	Smash	Elite (1)	164.0 (NS)	194.0 (NS)	166.0 (NS)
Tsai <i>et al.</i> [2000]	Dégagement	Elite (1)	152.0 (NS)	203.0 (NS)	185.0 (NS)
Luhtanen et Blomqvist [1993]	Dégagement	Junior (10)	119.0 (NS) <sup>a</sup>	118.0 (NS) <sup>a</sup>	168.0 (NS) <sup>a</sup>
Tsai <i>et al.</i> [2000]	Amorti	Elite (1)	145.0 (NS)	202.0 (NS)	196.0 (NS)

CHAPITRE 7. INFLUENCE DU BRAS ET DE SON MOUVEMENT DANS LA  
PRODUCTION DE VITESSE

Etude	Frappe	Participant ( <i>n</i> )	Angle épaule (°)	Angle coude (°)	Angle poi- gnet (°)
Hussain <i>et al.</i> [2011b]	Amorti	Expert (6)	46.5 (11.0)	146.7 (4.6)	213.7 (12.6)
Hussain et Arshad Bari [2011]	Smash coup droit	Expert (6)	162.8 (11.7)	188.3 (8.6)	181.5 (9.4)
Hussain et Arshad Bari [2011]	Smash revers	Expert (6)	151.2 (5.1)	185.7 (6.1)	194.8 (4.5)
Huang <i>et al.</i> [2002]	Smash revers	Junior (8)	192.7 (20.7)	169.5 (10.8)	164.5 (11.2)
Huang <i>et al.</i> [2002]	Dégagement revers	Junior (8)	176.5 (25.5)	168.7 (10.1)	178.3 (13.5)
Huang <i>et al.</i> [2002]	Amorti re- vers	Junior (8)	207.6 (57.6)	150.1 (23.2)	176.0 (32.8)
Hussain <i>et al.</i> [2011a]	Service court	Expert (6)	41.0 (17.0)	133.7 (6.8)	215.0 (9.2)
Hussain <i>et al.</i> [2011a]	Service long	Expert (6)	46.3 (9.3)	148.0 (3.5)	213.0 (17.7)
Smith <i>et al.</i> [1996]	Service long	Expert (2)	NS (NS)	16.0 (0.1)	59.7 (0.1)
Smith <i>et al.</i> [1996]	Service long	Débutant (1)	NS (NS)	34.2 (0.1)	10.2 (0.1)
Hussain <i>et al.</i> [2011b]	Service court	Junior (8)	38.8 (8.8)	130.8 (4.7)	122.5 (8.7)
Hussain <i>et al.</i> [2011b]	Service court re- vers	Junior (8)	98.0 (31.6)	132.8 (22.1)	114.5 (17.9)
Féminin					
Tsai <i>et al.</i> [2008]	Smash	Scolaire (7)	90.3 (21.0)	205.5 (8.7)	25.6 (9.0)

Etude	Frappe	Participant ( <i>n</i> )	Angle épaule (°)	Angle coude (°)	Angle poi- gnet (°)
Tsai <i>et al.</i> [2008]	Dégagement	Scolaire (7)	79.9 (24.1)	205.0 (6.2)	33.0 (10.9)
Tsai <i>et al.</i> [2008]	Amorti	Scolaire (7)	72.0 (16.6)	214.3 (3.6)	43.5 (7.9)

Note : moyenne et (écart-type)

NS : non spécifié

TABLEAU 7.2 – Angle de l'épaule, du coude et du poignet lors de différentes frappes

Les études de Tsai *et al.* [2005] et de Strohmeyer et Hudson [1991] révèlent des séquences d'activations musculaires similaires. Les faibles différences sont dues au nombre d'électrodes utilisées lors de leurs expérimentations et de la variabilité entre les joueurs. Le résultat de l'activation musculaire [Luhtanen et Blomqvist, 1993; Strohmeyer et Hudson, 1991] peut dépendre des compétences individuelles [Smith *et al.*, 1996] et des préférences dans l'exécution de la frappe [Bird *et al.*, 1991; Coleman *et al.*, 2001].

Le tableau 7.2 montre les angles des différents segments du bras pouvant être un avantage lors de l'exécution d'une frappe [Lee, 1993; Luhtanen et Blomqvist, 1993; Mao *et al.*, 2000]. L'angle d'impact et la vitesse angulaire influencent également la puissance des frappes [Sakurai *et al.*, 1989] (tableau 7.3).

Etude	Frappe	Participants ( <i>n</i> )	Vitesse angulaire épaule (°/s)	Vitesse angulaire coude (°/s)	Vitesse angulaire poignet (°/s)
Masculin					
Tsai <i>et al.</i> [1998]	Smash ex- tension	Elite (7)	-470.0 (NS)	1035.0 (NS)	-1447.0 (NS)
Tsai <i>et al.</i> [1998]	Smash ex- tension	Scolaire (4)	-475.0 (NS)	538.0 (NS)	-996.0 (NS)
Rambely <i>et al.</i> [2005a]	Smash	Elite (12)	-177.4 (285.5)	171.4 (544.9)	339.4 (818.3)

CHAPITRE 7. INFLUENCE DU BRAS ET DE SON MOUVEMENT DANS LA  
PRODUCTION DE VITESSE

Etude	Frappe	Participants ( <i>n</i> )	Vitesse angulaire épaule (°/s)	Vitesse angulaire coude (°/s)	Vitesse angulaire poignet (°/s)
Tsai <i>et al.</i> [1998]	Smash	Elite (7)	-479.0 (NS)	793.0 (NS)	-1167.0 (NS)
Tsai <i>et al.</i> [2000]	Smash	Elite (1)	-224.0 (NS)	-784.0 (NS)	-985.0 (NS)
Tsai <i>et al.</i> [1998]	Smash	Scolaire (4)	-152.0 (NS)	569.0 (NS)	-984.0 (NS)
Tsai <i>et al.</i> [2000]	Dégagement	Elite (1)	-266.0 (NS)	-484.0 (NS)	-1427.0 (NS)
Luhtanen <i>et</i> Blomqvist [1993]	Dégagement	Junior (10)	1.4 (NS) <sup>a</sup>	14.0 (NS) <sup>a</sup>	0.3 (NS) <sup>a</sup>
Tsai <i>et al.</i> [2000]	Amorti	Elite (1)	-401.0 (NS)	-174.0 (NS)	-438.0 (NS)
Hussain <i>et</i> Arshad Bari [2011]	Smash	Elite (6)	605.5 (71.1)	728.2 (8.8)	1718.5 (254.8)
Hussain <i>et</i> Arshad Bari [2011]	Smash revers	Elite (6)	229.3 (3.6)	872.0 (46.9)	1393.7 (72.0)
Huang <i>et al.</i> [2002]	Smash revers	Junior (8)	-271.7 (122.6)	745.7 (665.6)	-1497.4 (509.2)
Huang <i>et al.</i> [2002]	Dégagement revers	Junior (8)	-184.1 (159.6)	524.0 (488.8)	-1131.1 (569.0)
Huang <i>et al.</i> [2002]	Amorti re- vers	Junior (8)	-383.3 (270.8)	862.0 (680.5)	-591.7 (480.2)
Féminin					
Tsai <i>et al.</i> [2008]	Smash	Scolaire (7)	-78.0 (206.0)	176.0 (131.0)	NS (NS)

Etude	Frappe	Participants ( <i>n</i> )	Vitesse angulaire épaule (°/s)	Vitesse angulaire coude (°/s)	Vitesse angulaire poignet (°/s)
Tsai <i>et al.</i> [2008]	Dégagement	Scolaire (7)	84.0 (136.0)	203.0 (123.0)	NS (NS)
Tsai <i>et al.</i> [2008]	Amorti	Scolaire (7)	-125.0 (102.0)	-110.0 (50.0)	NS (NS)

Note : moyenne et (écart-type)

NS : non spécifié

TABLEAU 7.3 – Vitesse angulaire de l'épaule, du coude et du poignet lors de différentes frappes

## 7.2 Le bras de levier

Le badminton génère la plus grande vitesse de projectile de tous les sports de balles ( $\approx 493$  km/h ou  $\approx 137$  m/s) [Cohen, 2015]. En comparaison, la balle de tennis a été enregistrée à (262 km/h ou 73 m/s). Dans les deux activités, la longueur de la raquette (longueur  $\approx 68$  cm) et la vitesse de la main ( $v_{main} \approx 28$  m/s) sont identiques [Wagner *et al.*, 2014]. La différence majeure entre ces deux activités est la masse plus importante de la raquette de tennis ( $m \approx 280$  g) par rapport à la raquette de badminton ( $m \approx 80$  g).

Les mouvements du bras sont essentiels dans la réalisation d'un lancer et d'une frappe. Les joueurs de handball et de water-polo utilisent des techniques de lancer pour marquer des buts. Les joueurs de volleyball et de football frappent dans le ballon pour marquer des points. Les joueurs de badminton, de squash et de tennis servent et/ou smashent pour remporter l'échange.

Les différences dépendent du type de projection de la balle ou du volant (lancer ou frapper), ainsi que des règles de l'activité sportive, la taille et la masse du ballon. La séquence proximo-distale et les angles articulaires de l'épaule, du coude et du poignet sont similaires lors de la phase d'accélération de la frappe (figure 7.3a). Les modifications semblent être prises en compte lorsque la projection de la balle ou du volant,



FIGURE 7.3 – Comparaison entre les différentes phases de frappe

dépend du lancer ou du frapper avec la présence ou non de la raquette. Cela suggère selon [Wagner et al. \[2014\]](#) qu'il existe un pattern moteur proche et quasi identique à l'ensemble de certaines activités.

### 7.2.1 Objectif

Les nombreuses et différentes vitesses obtenues par le projectile lors de ces divers sports, avec un comportement moteur proche nous amènent à nous interroger sur la place et la catégorisation des différents sports selon la vitesse de projectile. L'objectif de cette étude est de mesurer l'intérêt apporter par un segment supplémentaire au niveau du bras (la raquette) dans l'augmentation de la vitesse de frappe.

### 7.2.2 Le bras de levier

Le bras de levier est défini comme étant la distance séparant une extrémité du levier (raquette) de son point d'appui (l'épaule). C'est aussi le rapport des deux bras, qui donne l'amplitude de l'effet de levier [[Dufour et Pillu, 2007](#)]. Ainsi le calcul du ratio de vitesse entre la vitesse de la main ( $v_{main}$ ) et de la raquette ( $v_{raquette}$ ) est influencé par la longueur du bras du joueur ( $l_{bras}$ ) et celle de la raquette ( $l_{raquette}$ ).

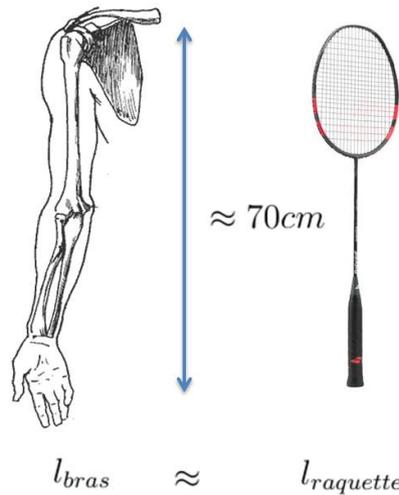


FIGURE 7.4 – Comparaison de la longueur du bras et de la raquette

Pour comprendre ce phénomène de bras de levier, nous avons pris en compte la longueur de la raquette et la longueur du bras du joueur. Cela pour prédire le ratio de vitesse ( $v_{raquette}/v_{main}$ ) en fonction de la longueur de la raquette  $l_{raquette}$  et du bras  $l_{bras}$  :

$$\frac{v_{raquette}}{v_{main}} = \frac{l_{bras} + l_{raquette}}{l_{raquette}} \quad (7.1)$$

Le fait d'augmenter la longueur du bras grâce au rajout de la raquette, a pour influence théorique d'augmenter la vitesse de la tête de raquette. Celle-ci est le point le plus éloigné de l'axe de rotation de l'épaule.

### 7.2.3 Protocole expérimental

Pour observer l'impact de la longueur sur le ratio de la vitesse, nous avons demandé à un joueur expert de l'activité de participer à cette étude. L'athlète était physiquement en bonne santé et n'a signalé aucune blessure avant et durant tout le temps de l'étude. Le tableau 7.4 résume les données anthropométriques du joueur.

Après un échauffement général de 15 minutes, le participant était invité à réaliser plusieurs smashes avec l'équipement proposé. Cette phase de familiarisation permet au joueur de s'appropriier les différentes raquettes présentes lors de l'expérimentation. Nous avons réussi à obtenir 5 raquettes de différentes tailles. Les différentes raquettes

Variable	Joueurs
Age (année)	25
Taille (cm)	183
Masse (kg)	79.8
% de masse grasse	13.8
% de muscle	46.6
Heure de pratique (heure par semaine)	14
Longueur épaule - coude (cm)	39.4
Longueur coude - poignet (cm)	30.3
Longueur bras (cm)	69.7

TABLEAU 7.4 – Anthropométrie du joueur lors de l'expérience

avaient pour longueur 240 mm, 350 mm, 450 mm, 530 mm, et 675 mm (figure 7.5). Le joueur avait pour consigne de smasher le plus fort possible un volant accroché au plafond de la salle à l'aide d'une ficelle. Le joueur devait smasher 10 fois le volant avec chaque raquette. Chaque frappe était entrecoupée de 30 secondes de récupération. Au total le joueur a frappé 50 fois le volant avec des raquettes différentes.



FIGURE 7.5 – Utilisation de différentes tailles de raquette durant l'expérience

Pour compléter le dispositif expérimental, 9 caméras de capture de mouvement (Vicon V8i) enregistraient la séquence à une fréquence d'enregistrement de 1000 Hz avec une précision de 0.1 mm (Vicon Peak, Oxford, Royaumes-Unies). De plus, toutes les raquettes utilisées durant l'expérimentation étaient équipées de plusieurs marqueurs selon le modèle de [Kwan *et al.*, 2008b]. Ils étaient placés sur le bas et le haut du manche, sur la tige de raquette, et sur la tête de raquette (haut, bas, gauche et droite).

Le participant était équipé de 6 marqueurs réfléchissants de 14 mm de diamètre, apposés sur des repères anatomiques spécifiques comme le recommande la [Société Internationale de Biomécanique \(ISB\)](#) [Wu *et al.*, 2005]. Les marqueurs réfléchissants ont été fixés sur le bras dominant (le bras tenant la raquette) :

- (a) sur l'acromion ;
- (b) sur l'épicondyle latéral et médial du coude ;
- (c) sur le processus styloïde de l'ulna et du radius ;
- (d) sur la tête du second os métacarpien.

Au cours de la capture du mouvement, les axes ont été définis comme suit : l'axe  $x$  a été défini sur le plan antéro-postérieur, l'axe  $y$  sur le plan transversal et l'axe  $z$  sur le plan frontal. Ainsi, le plan  $x$  et  $y$  était identique à celui du terrain. L'orientation de l'humérus, du radius, de l'ulna et des segments de la main a été déterminée par l'axe  $x$  antéropostérieur, l'axe  $y$  médiolatéral et l'axe  $z$  longitudinal comme le décrit [Wu \*et al.\*](#) [2005].

Enfin, nous avons créé une raquette rigide. Pour se faire, nous avons créé un marqueur virtuel en utilisant les deux marqueurs au niveau du manche. Le nouveau marqueur est à la même position que le marqueur en tête de manche quand la raquette ne défléchit pas. Cependant, il ne défléchit pas lorsque le manche de la raquette accélère, permettant ainsi de créer une raquette virtuelle rigide. Le nouveau marqueur et les calculs des différentes vitesses ont été réalisés à l'aide du logiciel Matlab R13a (The Math Works Inc, Natick, MA, USA).

#### 7.2.4 Résultat expérimental

Pour tester notre prédiction, la longueur de la raquette a été modifiée afin d'analyser les différentes vitesses au niveau de la tête de raquette. Dans cette expérimentation, nous utilisons des raquettes totalement rigides afin de ne pas inclure la déflexion qui aurait pu influencer la vitesse de la tête de raquette. Nous verrons ce paramètre dans le chapitre suivant.

Les différences de longueurs induisent des vitesses de tête de raquette différentes (figure 7.6). Nous obtenons un facteur  $v_{raquette}/v_{main} \approx 2.1$  entre la vitesse de la main

et la vitesse de la tête de raquette. Ainsi, plus la longueur de la raquette et du bras seront importantes, plus la vitesse de la tête de raquette sera élevée. Pour limiter la longueur du bras de levier, les règles du Badminton depuis juin 2015 n'autorisent que des raquettes n'excédant pas 680 mm.

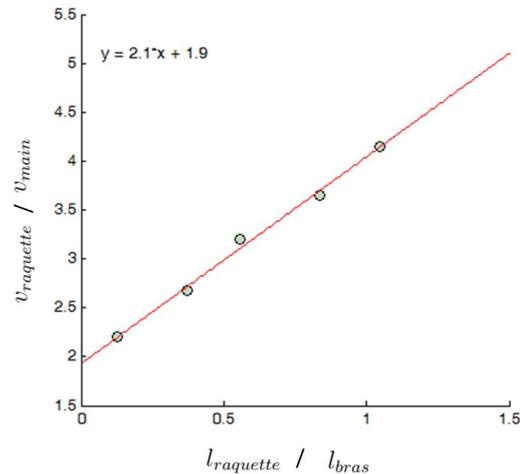


FIGURE 7.6 – Influence de la longueur de bras et de la raquette sur la vitesse de la raquette et de la main

De plus, nous avons vu précédemment que la longueur de la raquette n'est pas le seul facteur permettant d'accroître la vitesse de celle-ci. Nous avons pris comme participant un expert de l'activité et les différences avec un débutant se trouvent sur la vitesse qu'il est capable d'accumuler au niveau de la main. La vitesse angulaire du bras ( $v_{ang}$ ) composée de l'épaule et du coude composée de la séquence proximo-distal et du cycle étirement-renvoi augmente considérablement la performance. La vitesse de la raquette pourrait se décliner comme étant :

$$v_{raquette} = \frac{l_{bras} + l_{raquette}}{l_{raquette}} \cdot v_{ang} \quad (7.2)$$

La vitesse incluse sur la raquette est influencée par la vitesse du bras comme nous l'avons souligné dans le chapitre précédent. La technique de la frappe dépend de l'athlète et de sa capacité à optimiser la vitesse de son bras afin d'obtenir la meilleure performance possible.

## 7.3 Extension ou pronation de l'avant-bras, laquelle produit la plus grande vitesse ?

Le mouvement de lancer a souvent été analysé dans différentes activités comme le handball, le volleyball, le water polo et le baseball [Alfredson *et al.*, 1998]. Les différentes techniques pour lancer ou pour frapper un projectile sont assez similaires dans la structure temporelle et cinématique du mouvement du bras. Les récentes études ont montré des similitudes entre le service au tennis et l'attaque au volleyball à travers la séquence proximo-distal. Wagner *et al.* [2014] mettent en avant des timings de frappes différents dans la réalisation du mouvement.

### 7.3.1 Objectif

Au cours de notre revue de littérature, les différentes études ont montré que le mouvement du bras permettait d'obtenir de meilleures performances en badminton. Lors de la phase de frappe, l'avant-bras effectue une pronation radio-ulnaire et une extension du coude [Sakurai *et al.*, 1989], accélérant ainsi la raquette de badminton. Cependant la coordination et la synchronisation de ces deux mouvements ne semblent pas être si évidentes que cela. Il est important d'observer si l'un de ces deux mouvements ou si les deux mouvements sont des prédicateurs de la performance.

L'objectif de cette étude est de comparer l'effet de la pronation radio-ulnaire de l'avant-bras et l'extension de l'avant bras sur la vitesse finale de la raquette et sa déflexion selon le niveau d'expertise du participant.

### 7.3.2 Protocole expérimental

Pour réaliser cette expérimentation, nous avons demandé la participation de 24 personnes. Les participants ont été séparés en deux groupes distincts : le premier était composé de dix experts et le second de quatorze novices (tableau 7.5). Tous les participants étaient en très bonne condition physique et n'ont pas signalé la moindre blessure durant tout le temps de l'expérience.

Sujet	Age (ans)	Taille (cm)	Masse (kg)	Année de pratique
Novice (n = 14)	24.2 (3.5)	170.2 (9.1)	65.1 (11.5)	0.4 (0.7)
Expert (n = 10)	23.3 (3.2)	179.5 (8.3)	76.3 (8.3)	16.1 (4.2)

TABLEAU 7.5 – Caractéristiques anthropométriques des participants

### 7.3.2.1 Procédure expérimentale

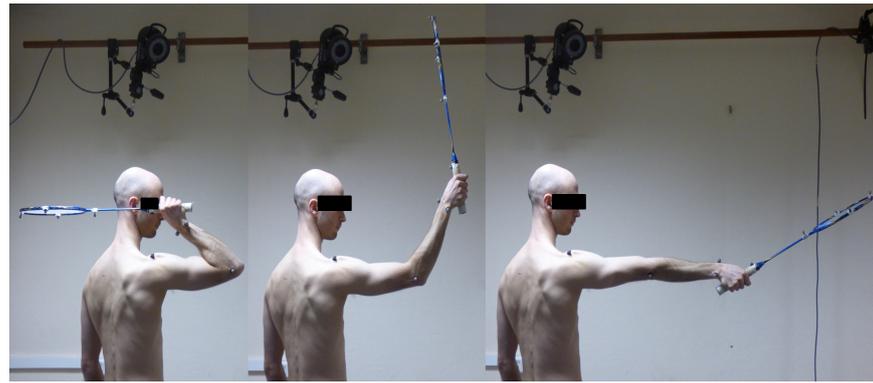
Après un échauffement général de 15 minutes, les sujets pouvaient effectuer autant de fois qu'ils le souhaitaient les deux mouvements spécifiques (extension de l'avant-bras et pronation radio-ulnaire). Cela permettait de tester le matériel mais aussi d'avoir des instructions des expérimentateurs dans la réalisation du geste. La même raquette était utilisée durant toute l'expérimentation (Wilson Draco Blx ; 86 g ; 675 mm). Les deux conditions (la pronation radio-ulnaire et l'extension de l'avant-bras) étaient incluses durant cette session d'essais. Les participants devaient répéter 10 fois chaque condition dans un ordre aléatoire. Il y avait 30 secondes de repos entre chaque frappe et la vitesse de la raquette était donnée entre chaque essai.

### 7.3.2.2 Déroulement du mouvement à réaliser

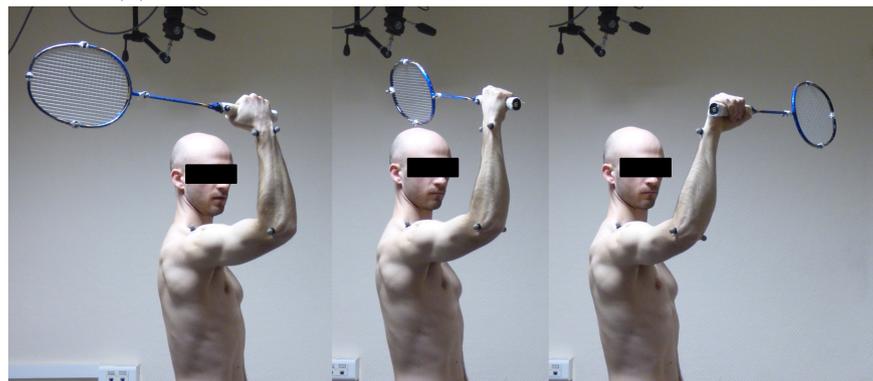
Durant la phase d'extension de l'avant-bras, les participants avaient comme instruction de fixer leur épaule et d'avoir le coude fléchi à 90 degrés selon le plan sagittal et en position debout. Par la suite, ils devaient étendre leur avant bras selon le plan sagittal afin de donner le maximum de vitesse possible à la tête de raquette sans bouger le corps (figure 7.7a).

Durant la phase de pronation radio-ulnaire, les participants avaient des consignes identiques à celles demandées lors de la phase d'extension. Ils devaient effectuer une pronation radio-ulnaire afin de donner le maximum de vitesse possible à la tête de raquette sans bouger le corps (figure 7.7b).

Pour valider l'essai, les vitesses de l'épaule et du coude devaient être inférieures à 0.5 m/s. Au total, 97 % des données obtenues ont pu être analysées.



(a) Exemple d'extension de l'avant-bras



(b) Exemple de pronation radio-ulnaire

FIGURE 7.7 – Mouvement d'extension et de pronation

### 7.3.2.3 Dispositif de recueil des données biomécaniques

Le dispositif expérimental de capture du mouvement consistait à enregistrer à l'aide de 9 caméras Vicon V8i, à une fréquence de 250 Hz (Vicon Peak, Oxford, UK). Pour l'analyse cinématique, six marqueurs réfléchissants ont été fixés sur des repères anatomiques spécifiques du bras de chaque participant (Plug-In Gait Marker Set, Vicon Peak). Les marqueurs étaient fixés sur le bras dominant au niveau de l'acromion, de l'épicondyle médiale huméral, du processus styloïde radial et ulnaire et du 2<sup>ème</sup> processus métacarpien de la main comme recommandé par la Société Internationale de Biomécanique [Wu *et al.*, 2005].

La raquette était équipée de six marqueurs, suivant le modèle proposé par Kwan *et al.* [2008a] : sur le haut et le bas du manche, sur la tige de raquette et sur le haut, gauche et droit de la tête de raquette (figure 7.8). Pour calculer les vitesses des différents marqueurs, le modèle 3D a été utilisé (Plug-In Gait Marker Set, Vicon Peak) [David *et al.*, 1991]. Les marqueurs réfléchissants placés sur la raquette avaient une

masse comprise entre 1.2 - 2.4 g chacun, augmentant la masse totale de la raquette de 12.4 g (soit environ +14 % de plus que la masse initiale de la raquette).



FIGURE 7.8 – Raquette de badminton équipée de marqueurs réfléchissants

L'axe  $x$  a été défini comme étant l'axe antéro-postérieur, l'axe latéral  $y$  et l'axe vertical  $z$ , où le plan  $xy$  était identique à celui d'un terrain de badminton. L'orientation de l'humérus, du radius, de l'ulna et des segments de la main a été déterminée comme étant l'axe  $x$  perpendiculaire antéro-postérieur, l'axe médio-latéral  $y$  et l'axe longitudinal  $z$  selon la description de [Wu et al. \[2005\]](#). L'angle durant la flexion du coude était déterminé selon l'axe longitudinal des segments proximaux et distaux.

#### 7.3.2.4 Analyse statistique

Toutes les statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Statistica 10 (StatSoft Inc., Tulsa, OK). Les moyennes et les écarts-types ont été calculés pour les statistiques descriptives. Des groupes de variables ont été utilisés pour l'analyse statistique :

- a) la vitesse maximale  $\text{m.s}^{-1}$  du poignet, du manche, de la tige et de la tête de raquette ;
- b) l'accélération maximale en  $\text{m.s}^{-2}$  du poignet, du manche, de la tige et de la tête de raquette ;
- c) la vitesse angulaire en  $^{\circ}/\text{s}$  de l'épaule, du coude et du poignet ;
- d) l'angle balayé par le bras en degré ( $^{\circ}$ ) de l'épaule, du coude, du poignet, du manche et de la tête de raquette ;
- e) l'angle maximal de la déflexion de raquette en mm.

Pour déterminer les effets du mouvement du bras, l'utilisation d'une [ANOVA](#) à mesure répétée à été réalisée selon le mouvement (extension et pronation) entre tous les sujets et selon leurs niveaux d'expertise. Dans le cas où l'[ANOVA](#) était significative, nous réalisons un post hoc de Fischer et un test de puissance. Toutes les analyses

statistiques avaient comme seuil de significativité  $p < 0.5$  et d'une taille de l'effet défini comme étant petit  $\eta^2 > 0.01$ , moyen  $\eta^2 > 0.09$  et large  $\eta^2 > 0.25$  [Cohen, 1988].

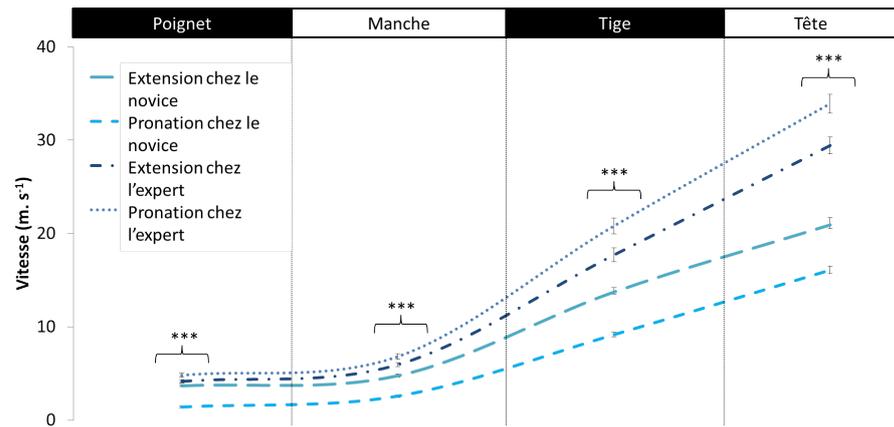
### 7.3.3 Résultats expérimentaux

Nos résultats nous ont permis d'observer une plus grande vitesse de raquette significative chez les experts plutôt que chez les novices quelque soit le mouvement ( $p < 0.001$ ). Chez les novices, la vitesse maximale de la tête de raquette lors d'une extension est plus importante que celle produite par une pronation ( $p < 0.001$ ). À l'inverse chez l'expert, la vitesse produite par une pronation est plus importante ( $p < 0.001$ ) (figure 7.10a). L'accélération maximale de la tige et de la tête raquette sont significativement supérieures chez l'expert ( $p < 0.05$ ), alors qu'il n'y a pas de différence significative au niveau du poignet et du manche entre les deux groupes (figure 7.10b).

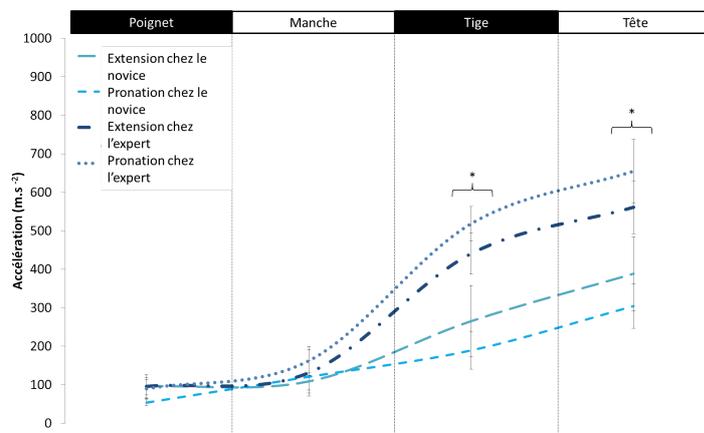
Le temps de réalisation caractéristique du mouvement chez l'expert est significativement plus court que chez le novice ( $p < 0.01$ ), alors qu'il n'existe pas de différence significative au niveau du poignet durant la pronation radio-ulnaire entre les deux groupes (figure 7.10a et 7.10b). La vitesse angulaire maximale est significativement plus importante durant un mouvement d'extension chez le novice (+39 % ;  $p < 0.05$ ) et de pronation chez l'expert (+48 % ;  $p < 0.001$ ) (figure 7.11b).

Il n'y a pas de différence significative au niveau de l'angle balayé par le coude durant une extension de l'avant-bras entre le novice et l'expert (figure 7.11a). Mais, durant la pronation radio-ulnaire, l'angle balayé par les experts est significativement plus important que chez le novice et ainsi que lors du mouvement d'extension (+55 % ;  $p < 0.05$ ). Les mêmes résultats se retrouvent autour de la vitesse angulaire (figure 7.11b).

Il n'y a pas de différence significative entre la déflexion maximale de la raquette durant l'extension de l'avant-bras (52.9 (1.3) mm) et la pronation radio-ulnaire (62.3 (1.1) mm). À l'opposé, les élites produisent une plus grande déflexion (70.4 (8.2) mm) que les novices (44.8 (5.8) mm) quelque soit le type de mouvement ( $p < 0.05$ ). La plus grande déflexion est obtenue chez l'expert lors d'un mouvement de pronation radio-ulnaire (83.7 (1.7) mm). Il est significativement supérieur lors d'une extension de l'avant-bras chez l'expert (57.1 (2.2) mm ;  $p < 0.05$ ), d'une extension chez le novice (48.7 (7.5)



(a) Vitesse de la raquette selon les différents mouvements et niveaux



(b) Accélération de la raquette selon les différents mouvements et niveaux

FIGURE 7.9 – Vitesse et accélération des différents mouvements et niveaux, avec \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$  et \*\*\*  $p < 0.001$

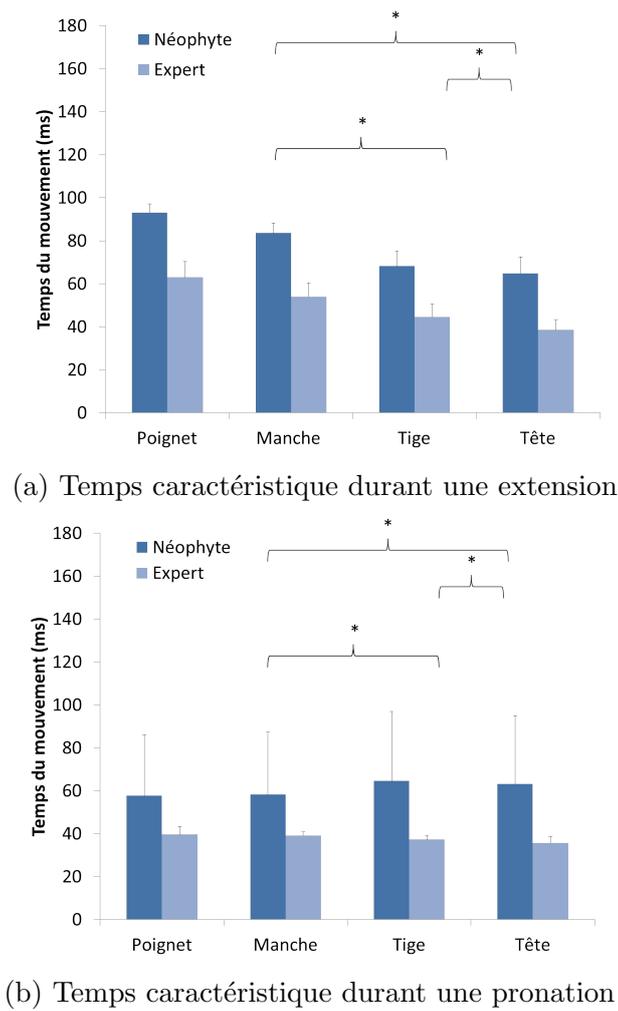


FIGURE 7.10 – Temps de mouvement d’extension et de pronation avec \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$  et \*\*\*  $p < 0.001$

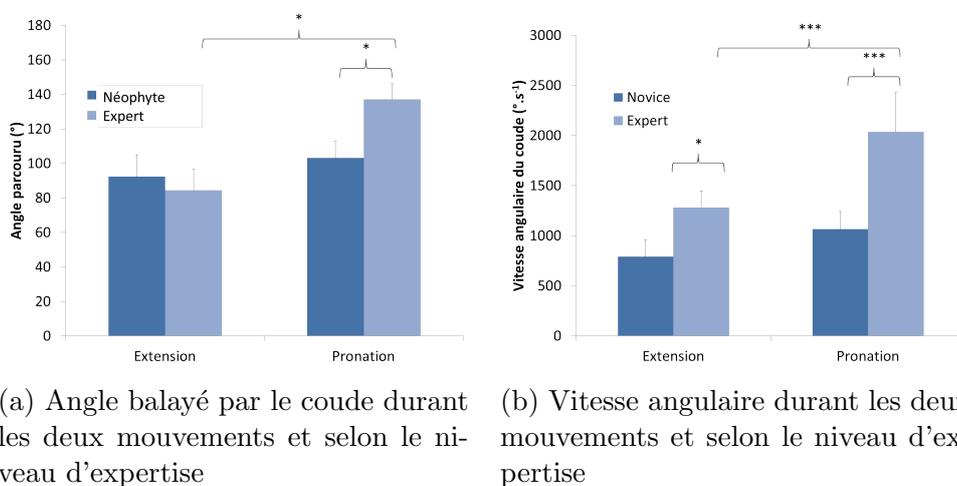


FIGURE 7.11 – Angle balayé durant une extension et une pronation avec \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$  et \*\*\*  $p < 0.001$

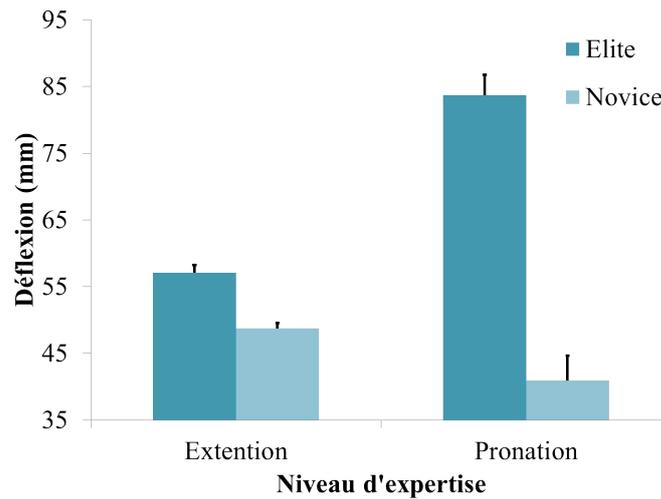


FIGURE 7.12 – Déflexion de la raquette selon le niveau d'expertise et le mouvement

mm ;  $p < 0.01$ ) et de la pronation radio-ulnaire du novice (40.9 (6.1) mm ;  $p < 0.01$ ) (figure 7.12).

### 7.3.4 Discussion

Notre étude cherche à différencier deux types de mouvement d'avant-bras présents lors d'une frappe : la pronation radio-ulnaire et l'extension de l'avant-bras, chez des joueurs de niveaux différents. L'analyse de la vitesse de la raquette dans notre étude est de  $\approx 33$  m/s. Cette valeur est inférieure à celle que nous pouvons trouver dans la littérature. [Kwan et al. \[2010a\]](#) ont trouvé des valeurs comprises entre 37.5 et 52 m/s et qui révèlent que la pronation radio-ulnaire contribue à environ à  $\approx 57$  % de la vitesse totale. Cette plus grande vitesse s'explique par l'observation du mouvement global du bras alors que dans notre étude, nous observions deux mouvements isolés et précis.

La vitesse enregistrée dans notre étude est proche des valeurs pour des mouvements isolés que nous retrouvons dans la littérature. Dans l'étude de [Gowitzke et Waddell \[1977\]](#), la vitesse obtenue par un mouvement isolé est de  $\approx 33$  m/s, représentant 53 % de la vitesse totale. Cela confirme le travail de [Tang et al. \[1995\]](#) qui soulignent l'importance du mouvement de pronation radio-ulnaire durant un smash en badminton.

### 7.3.5 L'extension de l'avant-bras ou la pronation radio-ulnaire ?

Le premier objectif de cette étude est de comparer les deux mouvements sur la vitesse finale de la raquette. Lors d'une pronation radio-ulnaire, la tête de raquette est plus rapide que lors d'une extension de l'avant-bras (+16 %). Cette plus grande vitesse résulte d'une plus grande accélération (+8 %) et d'une plus grande vitesse angulaire (+70 %) des segments du bras. La vitesse angulaire du coude dans notre étude est de 912.3 (334.3) °/s. Elle est proche de la valeur (728.2 (8.8) et 1035 (6.3) °/s) que nous pouvons trouver dans la littérature qui a étudié le smash en extension [Hussain et Arshad Bari, 2011; Tsai *et al.*, 1998].

Lors d'une pronation radio-ulnaire, la vitesse angulaire augmente jusqu'à 2430 °/s, soit +61 % que celle obtenue lors d'une extension. De plus, l'angle balayé par la pronation est 25 % plus grand qu'avec l'extension. Cela augmente le temps total du mouvement et permet d'accélérer considérablement la raquette. Cela explique l'apport très important de la pronation radio-ulnaire dans la production de la vitesse de raquette.

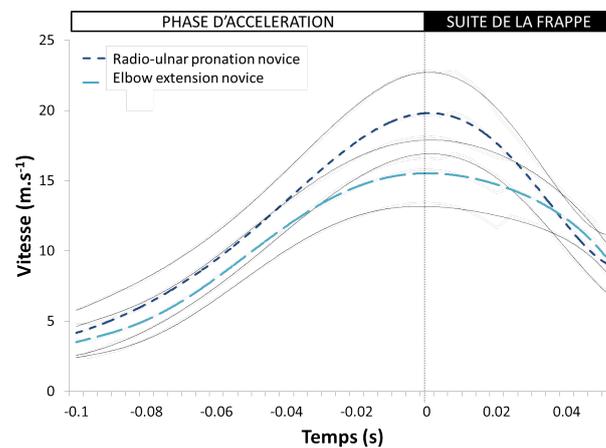
### 7.3.6 Discriminer selon le mouvement

Le deuxième objectif de cette étude est de comparer l'effet de l'expertise en référence au type de mouvement. La vitesse maximale de la raquette chez le débutant est obtenue avec une extension (20.9 (4.8) m/s), qui amène un gain de +47 % par rapport à la pronation radio-ulnaire. À l'inverse, chez l'expert, la pronation radio-ulnaire produit la plus grande vitesse (33.9 (5.8) m/s), avec un gain de +53 %.

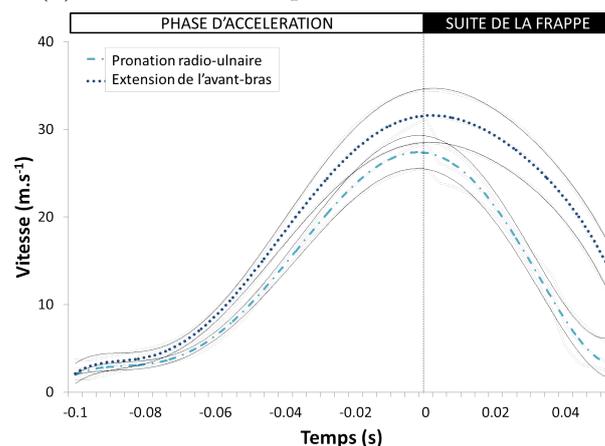
La différence entre les plus grandes vitesses des deux groupes est de +39 %, obtenue par la pronation chez l'expert et l'extension chez le novice. Ainsi, la pronation radio-ulnaire est spécifique au niveau du joueur et est un indicateur d'expertise [Gowitzke et Waddell, 1979c]. Elle permet à l'élite d'accroître la vitesse de la raquette par rapport au débutant. La littérature scientifique traitant de l'analyse cinématique en badminton a montré que les élites étaient encore plus efficaces lorsqu'ils utilisaient la séquence proximo-distale couplée avec la pronation radio-ulnaire [Sorensen *et al.*, 2011].

La séquence proximo-distale (du coude au poignet) est utilisée pour que la raquette

atteigne la vitesse maximale [Lees, 2003; Rasmussen *et al.*, 2010]. Cependant, Marshall et Elliott [2000] ont montré que le concept traditionnel de la séquence proximo-distale n'était pas suffisant pour décrire la complexité du mouvement de frappe dans les sports de raquette. Ainsi, un second mécanisme entre en action pour accroître la performance : le cycle étirement-renvoi. Une augmentation de la supination de l'avant-bras lors de la phase de préparation, cela amène le joueur à générer un cycle permettant d'obtenir un gain de vitesse juste au démarrage de la pronation. Lorsque le muscle et le tendon sont pré-activés et sont étirés immédiatement, une plus grande force peut être générée au début du mouvement (plus de 150 à 200 % de la force isométrique) [Bosco et Komi, 1979; Komi, 1983; Lees, 2003].



(a) Vitesse de la raquette lors de l'extension



(b) Vitesse de la raquette lors de la pronation

FIGURE 7.13 – Mouvement d'extension et de pronation

Notre étude montre que les élites, avant de commencer le mouvement vers l'avant, réalisent une hyper-supination associée à une rotation de l'épaule, le tout suivi par une

action concentrique rapide lors de la pronation sans le moindre délai. Ce mouvement n'est pas présent chez le novice [Waddell et Gowitzke, 2000].

De plus, ce mouvement “arrière” d’hyper-supination permet aux joueurs élites d’augmenter l’angle balayé par la raquette. Ils accroissent ainsi le temps et le trajet d’accélération de la raquette. Selon notre étude, l’angle balayé par les élites avec une pronation est plus grand que chez les novices (+25 %). Ce gain d’angle balayé permet d’accroître l’accélération de +16 % comparée avec l’extension de l’avant-bras. L’angle parcouru est similaire chez les joueurs novices (84.4 (18.1) °) et les joueurs experts (85.8 (10.1) °) ( $p > 0.05$ ).

Comme mentionné précédemment, dans notre étude, l’extension de l’avant-bras permet au novice d’obtenir la plus grande vitesse de raquette. Cela peut s’expliquer par le fait que l’extension est un mouvement d’avant-bras courant que les athlètes ont l’habitude de réaliser [Howard *et al.*, 2009; Joyce et Rack, 1974]. Chacun utilise son bras lors de tâches motrices variées, en s’aidant préférentiellement de l’extension de l’avant-bras, comme par exemple pour agripper, saisir ou attraper un objet.

Durant l’extension de l’avant-bras, la limitation anatomique est liée à la butée à l’extrémité de l’olécrane dans la fosse huméro-olécrânienne. Mais quelque soient les conditions, le temps du mouvement chez le novice est supérieur à celui de l’expert ( $p < 0.001$ ). Cela suggère que le mouvement réalisé par les novices nécessite plus de temps avant d’atteindre sa vitesse maximale. Cela a pour conséquence de réduire la vitesse angulaire quelque soit le mouvement. En comparant les deux niveaux, les élites ont des vitesses angulaires plus importantes durant l’extension (1285.6 (167.5) °/s; 791.3 (171.8) °/s) et durant la pronation (2036.9 (392.1) °/s; 1067.3 (174.5) °/s).

L’accélération maximale obtenue quelque soient les conditions est plus importante chez l’élite, +31 % lors d’une extension et +54 % lors d’une pronation. Cela suggère que les joueurs élites ont la capacité de recruter davantage et rapidement des unités motrices [Duchateau et Hainaut, 1990]. De plus, l’angle balayé durant la pronation radio-ulnaire est supérieur à celui balayé durant l’extension chez le novice et l’expert (+10 % et +39 %). La distance permet ainsi d’accroître la vitesse angulaire (+25 % et

+37 %).

Cette étude a pour objectif d’analyser la déflexion de la raquette et son impact sur la vitesse de celle-ci. La vitesse maximale est obtenue durant une pronation radio-ulnaire par les élites (33.9 (5.8) voir figure 3. Dans l’étude de [Kwan et al. \[2010b\]](#), des vitesses similaires ont été obtenues à l’aide d’un vérin (35 à 50 m/s).

Dans notre étude, nous considérons la vitesse maximale comme étant le moment où la raquette retourne à sa position de “repos” ou “initiale”. Nous avons relevé pour la déflexion de la raquette des valeurs comprises entre 39.4 à 149.3 mm. Nos valeurs sont supérieures à celles trouvées dans des études antérieures qui oscillaient entre 38.5 à 56.2 mm [[Kwan et al., 2010b](#)]. Cette différence peut être expliquée par une utilisation différente de la raquette, et par le fait que chaque raquette possède des propriétés élastiques qui lui sont propres. De plus, la flexibilité dans notre étude était plus importante que dans l’étude antérieure. Une autre explication à cette différence de déflexion peut être due au fait que dans l’étude précédente, l’expérimentation utilisait un vérin, alors que dans notre étude, nous avons demandé la participation à des joueurs. De plus, nous pouvons observer que quelque soit le niveau d’expertise, la raquette subit un phénomène de déflexion. Ainsi cette flexibilité ne dépend pas uniquement du niveau d’expertise mais de différents autres paramètres.

### 7.3.7 Conclusion

Nous savons que le niveau d’expertise du joueur influence la vitesse et la technique de frappe. Aussi, pour limiter l’effet de l’expertise et pour identifier les facteurs de performance, nous avons isolé des mouvements précis. Dans notre étude, les élites produisent la plus grande vitesse sur la raquette quelque soit le mouvement. Néanmoins, un des résultats majeurs constaté est chez le novice, la production de la vitesse maximale est obtenue par le biais de l’extension de l’avant-bras ; alors qu’à l’inverse, chez l’expert, elle est obtenue par la pronation radio-ulnaire.

## 7.4 Références

ALFREDSON, H., PIETILA, T. et LORENTZON, R. (1998). Concentric and eccentric

- shoulder and elbow muscle strength in female volleyball players and non-active females. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 8:265–270. [227](#)
- ARIFF, M. et RAMBELY, A. S. (2008). Determination of Torques at Upper Limb Joints During Jumping in Badminton Smash via Kane’s method. *In 26 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 73–76. [215](#), [216](#)
- BIRD, M., HILLS, L. et HUDSON, J. L. (1991). Intersegmental coordination an exploration of context. *In 9th International symposium, Biomechanics in Sports IX*, pages 233–237. [213](#), [215](#), [219](#)
- BOSCO, C. et KOMI, P. V. (1979). Potentiation of the mechanical behavior of the human skeletal muscle through prestretching. *Acta Physiologica Scandinavia*, 106(4):467–472. [236](#)
- BOWYER, G. W. (2010). Adult foot and ankle problems. *InnovAiT*, 3(11):657–670. [213](#)
- COHEN, C. (2015). *La physique du sport*. Thèse de doctorat. [221](#)
- COHEN, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavior sciences*. Hillsdale, Lawrence e édition. [231](#)
- COLEMAN, S. G. S., KARATZAFERI, C. et STONE, M. (2001). Biomechanical differences between loaded countermovement and static squat jumps. *In 19 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 30–32. [219](#)
- DAVID, R. B., ÖUNPUU, S., TYBURSKI, D. et GAGE, J. R. (1991). A gait analysis data collection and reduction technique. *Human Movement Science*, 10:575–587. [229](#)
- DUCHATEAU, J. et HAINAUT, K. (1990). Effects of immobilization on contractile properties, recruitment and firing rates of human motor units. *Journal of Physiology*, 422:55–65. [237](#)
- DUFOUR, M. et PILLU, M. (2007). *Biomécanique fonctionnelle*. Masson édition. [222](#)
- GOWITZKE, B. A. et WADDELL, D. B. (1977). The contributions of biomechanics in solving problems in badminton stroke production. *In International Coaching Conference*. [213](#), [216](#), [217](#), [234](#)

- GOWITZKE, B. A. et WADDELL, D. B. (1979a). Biomechanical principles applied to badminton stroke production. *In Proceedings of the International Congress of Sport Sciences*, pages 7–16. [213](#), [215](#), [216](#)
- GOWITZKE, B. A. et WADDELL, D. B. (1979b). Qualitative analysis of the badminton forehand smash as performed by international players. *In* GROPPPEL, J. L., éditeur : *Proceedings of a National Symposium on the Racket Sports : an exploration of research implications and teaching strategies*, pages 1–16. University of Illinois, Urbana-Champaign. [213](#), [215](#), [216](#)
- GOWITZKE, B. A. et WADDELL, D. B. (1979c). Technique of badminton stroke production : science in badminton. *In* TERAUDS, J., éditeur : *Racquet Sports*, pages 17–41. Del Mar, CA : Academic Publishers. [213](#), [215](#), [216](#), [235](#)
- GOWITZKE, B. A. et WADDELL, D. B. (1980). A force platform study of overhead power strokes in badminton. *In* GROPPPEL, J. L., éditeur : *Proceedings : International Symposium on the Effective Teaching of Racquet Sports*. University of Illinois, Urbana-Champaign. [213](#)
- GOWITZKE, B. A. et WADDELL, D. B. (1985). Myths and realities in badminton and tennis strokes. *In 3 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 52–55. [217](#)
- GOWITZKE, B. A., WADDELL, D. B., LEE, T. D. et POOLE, J. R. (1989). Effect of head position on badminton players' reaction times, movement times and kinematic elements of running backward. *Congress Proceedings : XII International Congress of Biomechanics*, page 103. [216](#)
- HENSLEY, L. D. et PAUP, D. C. (1979). A survey of badminton injuries. *British Journal of Sports Medicine*, 13(4):156–160. [213](#)
- HONG, Y., JUN WANG, S., KAI LAM, W. et TAK-MAN CHEUNG, J. (2014). Kinetics of badminton lunges in four directions. *Journal of Applied Biomechanics*, 30(1):113–118. [213](#)
- HOWARD, I. S., INGRAM, J. N., KÖRDING, K. P. et WOLPERT, D. M. (2009). Statistics of natural movements are reflected in motor errors. *Journal of Neurophysiology*, 102(3):1902–1910. [237](#)

- HSUEH, Y. C., CHEN, Y. Y., PAN, K. M. et TSAI, C. L. (2012). Biomechanical analysis of badminton forehand net shots. *In 30th Annual Conference of Biomechanics in Sports*, numéro 204, pages 256–259. [213](#)
- HUANG, K. S., SHAW-SHIUN, C. et TSAI, C. L. (2002). Kinematic analysis of three different badminton backhand overhead strokes. *In International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 200–202. [215](#), [218](#), [220](#)
- HUSSAIN, I., AHMED, S., ARSHAD BARI, M., MOHAMMAD, A. et KHAN, A. (2011a). Analysis of arm movement in badminton of forehand long and short service. *Innovative Systems Design and Engineering*, 2(3):13–18. [217](#), [218](#)
- HUSSAIN, I., AHMED, S., MOHAMMAD, A., KHAN, A. et ARSHAD BARI, M. (2011b). Videographical analysis of short service in badminton. *Journal of Education and Practise*, 2(2):1–6. [218](#)
- HUSSAIN, I. et ARSHAD BARI, M. (2011). Kinematical analysis of forehand and backhand smash in badminton. *Innovative Systems Design and Engineering*, 2(7):20–26. [214](#), [215](#), [216](#), [217](#), [218](#), [220](#), [235](#)
- HUSSAIN, I., PAUL, Y. et BARI, M. A. (2011c). Videographical analysis of drop and cut shot in badminton. *African Journal Physical, Health Education, Recreation and Dance*, 17(4):859–864. [214](#)
- JACKSON, S. L. et TANNER, E. A. (1993). Analysis of elite and novice disc golfers performing 10m putts. *In 11 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 368–370. [215](#)
- JAITNER, T. et WOLF, G. (2007). Analysis of badminton smash with a mobile measure device based on accelerometry. *In XXV ISBA Symposium vol 20*, pages 282–284. [214](#), [215](#)
- JOYCE, G. C. et RACK, P. M. (1974). The effects of load and force on tremor at the normal human elbow joint. *The Journal of Physiology*, 240:375–396. [237](#)
- KOMI, P. V. (1983). *Elastic potentiation of muscles and its influence on sport performance*. Verlag Karl Hofmann, Schomdorf, Germany, biomechani édition. [236](#)

- KRONER, K., SCHMIDT, S., NIELSEN, A., YDE, J., JAKOBSEN, B. W., MOLLER-MADSEN, B. et JENSEN, J. (1990). Badminton injuries. *British Journal of Sports Medicine*, 24(3):169–172. [213](#)
- KWAN, M., CHENG, C. L., TANG, W. T. et RASMUSSEN, J. (2010a). Measurement of badminton racket deflection during a stroke. *Sports Engineering*, 12(3):143–153. [234](#)
- KWAN, M., de ZEE, M. et RASMUSSEN, J. (2008a). Dynamic effects of badminton racket compliance. *Journal of Biomechanics*, 41(1):88. [229](#)
- KWAN, M., SKIPPER ANDERSEN, M., CHENG, C. L., TANG, W. T. et RASMUSSEN, J. (2010b). Investigation of high-speed badminton racket kinematics by motion capture. *Sports Engineering*, 13(2):57–63. [238](#)
- KWAN, M., SKIPPER ANDERSEN, M., ZEE, M. et RASMUSSEN, J. (2008b). Dynamic Model of a Badminton Stroke (P254). In *The Engineering of Sport 7 SE - 69*, pages 563–571. Springer Paris. [224](#)
- LAFFAYE, G. (2013). *Comprendre et progresser au Badminton*. Sport Pratique. [216](#)
- LEE, B. K. (1993). The effects of the kinematic link principle on performance. In *11 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 239–242. [214](#), [215](#), [219](#)
- LEES, A. (2001). What biomechanics can tell the coach? In *IV World Coaching Conference*, pages 19–30, Valencia. [215](#)
- LEES, A. (2003). Science and the major racket sports : a review. *Journal of Sports Sciences*, 21(9):707–732. [215](#), [236](#)
- LUHTANEN, P. H. et BLOMQVIST, M. T. (1993). Kinematics of clear in junior badminton players. In *International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 236–239. [217](#), [219](#), [220](#)
- MAO, S., LU, D., LI, Y. et HOU, M. (2000). Biomechanical characteristics of the wrist joint muscle in Chinese adults. In *18 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 1–4. [219](#)
- MARSHALL, R. N. et ELLIOTT, B. C. (2000). Long axis rotation : the missing link in proximal-to-distal sequencing. *Journal of Sports Sciences*, 18:247–254. [236](#)

- NIESNER, H. W. et RANTZMAYER, J. (1982). Basic theory of stroke production. *Newsletter of the German Badminton Federation*. 216
- POOLE, J. R. (1970). *A cinematographic analysis of the upper executing two basic badminton strokes*. Unpublished doctoral dissertation, Louisiana State University. 216, 217
- RAMBELY, A. S., OSMAN, N. A. A., USMAN, J. et WAN ABAS, W. A. B. (2005a). The contribution of upper limb joints in the development of racket velocity in the badminton smash. In *23 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 422–426. 214, 219
- RAMBELY, A. S. et WAN ABAS, W. A. B. (2008). Contact time and take-off speed relationship in determining height of jump in jumping badminton smash. In *26 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 660–663. 215
- RAMBELY, A. S., WAN ABAS, W. A. B. et YUSOF, S. (2005b). The analysis of the jumping smash in the game of badminton. In *23 International Symposium on Biomechanics in Sports*, numéro 1, pages 671–674. 215
- RANTZMAYER, J. (1977). Wrist snap - myth or reality? *Badminton Gazette* 58, pages 128–129. 216
- RASMUSSEN, J., KWAN, M., SKIPPER ANDERSEN, M. et de ZEE, M. (2010). Analysis of segment energy transfer using musculoskeletal models in a high speed badminton stroke. In *Proceedings of the 9th International Symposium on Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, pages 1–6. 215, 236
- SAKURAI, S., IKEGAMI, Y. et YABE, K. (1989). A three-dimensional cinematographic analysis of badminton strokes. In TSAROUCHAS, L., TERAUDS, J., GOWITZKE, B. et HOLT, L., éditeurs : *Biomechanics in Sports V*, pages 357–361, Athens. 216, 219, 227
- SAKURAI, S. et OHTSUKI, T. (2000). Muscle activity and accuracy of performance of the smash stroke in badminton with reference to skill and practice. *Journal of Sports Sciences*, 18(11):901–914. 215
- SEKI, K. (1983). Movement analysis of badminton. *Bulletin of Waseda University*, 15:103–106. 216

- SHARIFF, A. H., GEORGE, J. et RAMLAN, A. A. (2009). Musculoskeletal injuries among Malaysian badminton players. *Singapore Medical Journal*, 50(11):1095–1097. [213](#)
- SMITH, D. R., LUDWIG, K. M., BUTCHER, G. M. et WILKERSON, J. D. (1996). A comparison of three racket skills executed by novice and experienced performers. *In 14 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 240–243. [218](#), [219](#)
- SORENSEN, K., de ZEE, M. et RASMUSSEN, J. (2011). A biomechanical analysis of clear strokes in badminton executed by youth players of different skill levels. *In Congress of the International Society of Biomechanics*, page 2. [235](#)
- STROHMEYER, H. S., ARMSTRONG, C., LITVINSKY, Y., NOONEY, R., MOORE, J. et SMITH, K. (2009). Intersegmental coordination differences between beginning performers executing a badminton smash for accuracy of velocity. *In 27 International Conference on Biomechanics in Sports*. [215](#)
- STROHMEYER, H. S. et HUDSON, J. L. (1991). Interception and intersegmental coordination : effects of practise. *In 9 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 227–231. [219](#)
- SYAMIMI, K. N. S. K., SALIM, M. S. et OMAR, N. (2012). A biomechanical analysis of the knee during jump landing. *In 30th Annual Conference of Biomechanics in Sports*, numéro 39, pages 265–268. [215](#)
- TANG, H. P., ABE, K., AE, M. et KATOH, K. (1995). Three-dimensional cinematographic analysis of the badminton forehand smash : movements of the forearm and hand. *In Science and Racket Sports*. E. and F.N. Spon, Cambridge. [213](#), [234](#)
- TEU, K. K., KIM, W., TAN, J. et FUSS, F. K. (2005). Using dual Euler angles for the analysis of arm movement during the badminton smash. *Sports Engineering*, 8(3):171–178. [213](#), [216](#)
- TSAI, C. L., CHANG, S. S. et HUANG, C. (1998). Biomechanical analysis of differences in the badminton smash and jump smash between taiwan elite and collegiate players. *In ISBS'98 – Proceedings II*, pages 259–262. [214](#), [215](#), [219](#), [220](#), [235](#)
- TSAI, C. L., HSUEH, Y. C., PAN, K. M. et CHANG, S. S. (2008). Biomechanical analysis of different badminton forehand overhead strokes of Taiwan elite femal players. *In*

- 26 International Symposium on Biomechanics in Sports, Conference, Coaching and Sports Performance*, pages 719–722. [215](#), [218](#), [219](#), [220](#), [221](#)
- TSAI, C. L., HUANG, C., LIN, D. C., CHENG, C. C. et LAI, C. M. (2000). Biomechanical analysis of the upper extremity in three different badminton overhead strokes. *In 18 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 35–38. [213](#), [214](#), [217](#), [220](#)
- TSAI, C. L., YANG, C. C., LIN, M. S. et HUANG, K. S. (2005). The surface EMG activity analysis between badminton smash and jump smash. *International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 483–486. [213](#), [219](#)
- TSAI, C. L., YANG, C. C., LIN, M. S., HUANG, K. S. et CHANG, S. S. (2006). The surface EMG activity of the upper limb muscles of badminton forehand and backhand smashes. *24 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 3–6. [217](#)
- van CINGEL, R., KLEINRENSINK, G. J., MULDER, P., DE BIE, R. et KUIPERS, H. (2007). Isokinetic strength values , conventional ratio and dynamic control ratio of shoulder rotator muscles in elite badminton players. *Isokinetics and Exercise Science*, 15:287–293. [216](#)
- WADDELL, D. B. et GOWITZKE, B. A. (1977). Analysis of overhead badminton power strokes using high speed biplane cinematography. *In International Coaching Conference*. [213](#), [216](#), [217](#)
- WADDELL, D. B. et GOWITZKE, B. A. (1979). Coaching the power stroke in badminton. *In Science in Racquet Sports*, pages 1–5. [213](#)
- WADDELL, D. B. et GOWITZKE, B. A. (2000). Biomechanical principles applied to badminton power stroke. *In 18 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 1–6. [215](#), [216](#), [237](#)
- WAGNER, H., PFUSTERSCHMIED, J., TILP, M., LANDLINGER, J., von DUVILLARD, S. P. et MÜLLER, E. (2014). Upper-body kinematics in team-handball throw, tennis serve, and volleyball spike. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 24(2):345–354. [221](#), [222](#), [227](#)
- WEI, X. (2000). Application of filming and motion analysis in movement studies. *In 18 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 1–7. [213](#)

WU, G., van der HELM, F. C. T., VEEGER, H. E. J., MAKHSOUS, M., van ROY, P., ANGLIN, C., NAGELS, J., KARDUNA, A. R., MCQUADE, K., WANG, X., WERNER, F. W. et BUCHHOLZ, B. (2005). ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion—Part II : shoulder, elbow, wrist and hand. *Journal of Biomechanics*, 38(5):981–992. [225](#), [229](#), [230](#)





# Chapitre 8

## Prédiction entre le modèle théorique et le record du monde et optimisation de la vitesse

■ *Une théorie ne ressemble pas plus  
à un fait qu'une photographie ne  
ressemble à son modèle* ■

---

Edgar Watson Howe

### Sommaire

---

<b>8.1</b>	<b>Comparaison entre le modèle et le record du monde de Tan Boon Heong . . . . .</b>	<b>251</b>
8.1.1	Protocole expérimental . . . . .	252
8.1.2	Résultat expérimental . . . . .	252
<b>8.2</b>	<b>Optimisation de la vitesse selon le modèle théorique . . .</b>	<b>253</b>
<b>8.3</b>	<b>Références . . . . .</b>	<b>254</b>
	<b>Limite durant le travail doctoral . . . . .</b>	<b>268</b>
	<b>Perspectives de recherche . . . . .</b>	<b>269</b>

---



## 8.1 Comparaison entre le modèle et le record du monde de Tan Boon Heong

L'ensemble des expérimentations présentées dans les précédents chapitres nous amène à comparer notre prédiction de la vitesse de raquette ( $v_{raquette}$ ) avec le record du monde.

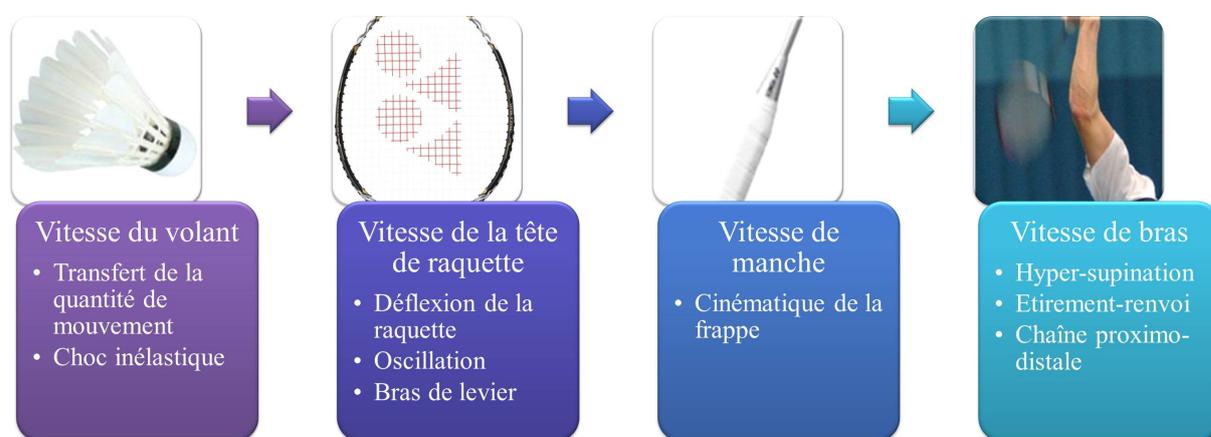


FIGURE 8.1 – Facteurs de performance dans la production de vitesse d'un volant, modèle prédictif

Pour résumer notre modèle, nous avons 3 principes primordiaux permettant de prédire la vitesse du volant à partir de la connaissance de la vitesse de main. Le premier principe est de prendre en compte l'influence du bras de levier et le ratio obtenu entre la raquette et la main du participant :

$$\frac{v_{raquette}}{v_{main}} = \frac{l_{bras} + l_{raquette}}{l_{raquette}} \approx 2.1 \quad (8.1)$$

La raquette de badminton est différente de l'ensemble des raquettes. Elle a la particularité d'être flexible et de pouvoir se défléchir lorsqu'elle est soumise à des accélérations en fonction de sa fréquence propre ( $\omega_0$ ) :

$$\frac{v_{raquette}}{v_{main}} = \frac{1}{l - \omega/\omega_0} \sin \frac{\omega/\omega_0}{1 + \omega/\omega_0} \approx 1.4 \quad (8.2)$$

Lors de l'impact entre le volant et le cordage, la raquette transfère de l'énergie afin

de propulser le volant le plus loin et le plus rapidement possible. Ainsi, le modèle de la conservation de la quantité de mouvement [Cohen *et al.*, 2014] est :

$$\frac{v_{volant}}{v_{raquette}} = \frac{l + e}{1 + m_{volant}/m_{raquette}} \approx 1.6 \quad (8.3)$$

### 8.1.1 Protocole expérimental

Afin de pouvoir comparer notre modèle théorique avec la véritable vitesse de volant du joueur de badminton, nous avons analysé la vitesse de la main de Tan Boon Heong au cours de son smash à 493 km/h (soit  $\approx 137$  m/s). Le smash a été enregistré à l'aide d'une caméra à haute vitesse à 500 Hz et a été analysé à l'aide d'un logiciel de traitement vidéo Dartfish (Dartfish 4.5.2, Fribourg, Suisse). À partir de cette vitesse de la main, nous appliquons notre modèle afin de comprendre et d'estimer la vitesse du volant lors de l'impact.



FIGURE 8.2 – Annonce par Yonex du record du monde

### 8.1.2 Résultat expérimental

Au cours de notre analyse vidéo, nous avons pu estimer la vitesse de la main du joueur à environ  $\approx 29$  m/s. Les différents sports de lancer amènent les sportifs à avoir des vitesses de main proches de  $\approx 28$  m/s [Rasmussen *et al.*, 2010; Wagner *et al.*, 2014]. La vitesse obtenue par le volant est de 493 km/h soit 137 m/s.

Selon notre modèle, le bras de levier dû à la longueur de raquette (2.1) augmente la vitesse, la déflexion de la raquette (1.4) et l'impact (1.6). Ainsi nous obtenons :

$$v_{volant} = levier * déflexion * impact * v_{main} \quad (8.4)$$

$$= 2.1 * 1.4 * 1.6 * 29 \quad (8.5)$$

$$= 136.4 \quad (8.6)$$

Notre prédiction permet d’obtenir une vitesse quasiment identique à celle obtenue en réalité par le joueur (137 m/s). Les différents principes semblent pouvoir expliquer et donc de prédire la vitesse du volant selon celle de la main. Cependant, notre modèle a été conçu dans des conditions optimales avec un joueur expert. La vitesse de la main chez un joueur novice est difficilement prédictible. Mais il serait toutefois possible d’extrapoler si celle-ci était optimisée par l’apprentissage.

## 8.2 Optimisation de la vitesse selon le modèle théorique

Une nouvelle question surgit avec cette prédiction : “peut-on accroître la vitesse du volant et franchir les 500 km/h?”. La réponse semble être “oui”. Il existe plusieurs moyens qui permettraient aux joueurs d’augmenter la vitesse de volant. Notre modèle prend en compte la longueur du bras et de la raquette. La raquette ne pourra pas être allongée en lien avec le règlement qui stipule une limitation de la longueur de la raquette. Mais chaque individu ayant une morphologie propre, un joueur avec une grande allonge pourra augmenter la vitesse de sa main [Wagner *et al.*, 2014].

L’optimisation du geste par la séquence proximo-distale [Bird *et al.*, 1991; Gowitzke et Waddell, 1979a,b,c; Jackson et Tanner, 1993; Jaitner et Wolf, 2007; Lee, 1993; Lees, 2001, 2003; Rasmussen *et al.*, 2010; Sakurai et Ohtsuki, 2000; Sorensen *et al.*, 2011; Waddell et Gowitzke, 2000] et l’optimisation du cycle étirement-renvoi sont une autre solution biomécanique à l’augmentation de la vitesse de la main [Bosco et Komi, 1979; Komi, 1983; Lees, 2003]. Cependant, les activités de lancer qui ont optimisé au mieux la vitesse du bras ne semblent pas, au niveau de la vitesse de la main, pouvoir lui faire franchir les 30 m/s. Il semblerait que les moyens anatomiques limitent “pour le moment” la vitesse du bras et donc la vitesse de la main.

Néanmoins, il semblerait qu'il existe un autre moyen d'augmenter la vitesse du volant. Au cours de notre expérimentation sur la déflexion de la raquette, nous avons pu voir que le ratio de vitesse obtenu était de l'ordre de 1.4. Afin d'influencer la déflexion, nous avons ajouté des masses plus ou moins importantes sur la tête de raquette pour augmenter. Nous avons pu observer au cours de cette expérimentation qu'une augmentation de 86 g sur la tête de raquette permettait d'optimiser et d'accroître le ratio entre la vitesse de la main et celle de la raquette d'environ 1.8 (soit  $\approx 80\%$ ) [Phomsoupha *et al.*, 2015]. Cependant, en augmentant la masse de 176 g, la déflexion était plus importante mais le ratio des vitesses étaient proche de 1.5. La déflexion peut être augmentée mais elle semble saturer et ne plus offrir un gain de vitesse aussi important que ce qui pourrait être obtenu.

En modifiant le ratio des vitesses de la déflexion sur notre modèle, nous obtenons selon la même vitesse de main du joueur :

$$v_{volant} = levier * déflexion * impact * v_{main} \quad (8.7)$$

$$= 2.1 * 1.8 * 1.6 * 29 \quad (8.8)$$

$$= 175.4 \quad (8.9)$$

L'équation 8.9 montre une augmentation de plus de +22 % de la vitesse du volant avec une optimisation de la déflexion. Cependant, l'augmentation de la déflexion par un rajout de masse au niveau de la tête de raquette accroît la fréquence d'oscillation qui passe de 60 ms à 120 ms. Comme nous avons pu l'observer précédemment, la phase d'accélération du joueur est proche des 60 ms. Ainsi, l'évolution du matériel, pourrait par la suite amener une plus grande déflexion sans pour autant modifier le temps de la phase d'accélération du joueur.

### 8.3 Références

BIRD, M., HILLS, L. et HUDSON, J. L. (1991). Intersegmental coordination an exploration of context. *In 9th International symposium, Biomechanics in Sports IX*, pages

233–237. [253](#)

BOSCO, C. et KOMI, P. V. (1979). Potentiation of the mechanical behavior of the human skeletal muscle through prestretching. *Acta Physiologica Scandinavia*, 106(4):467–472. [253](#)

COHEN, C., DARBOIS-TEXIER, B., BRUNEL, E., QUÉRÉ, D. et CLANET, C. (2014). The aerodynamic wall. *Proceedings of the Royal Society*, 470:1–20. [252](#)

GOWITZKE, B. A. et WADDELL, D. B. (1979a). Biomechanical principles applied to badminton stroke production. *In Proceedings of the International Congress of Sport Sciences*, pages 7–16. [253](#)

GOWITZKE, B. A. et WADDELL, D. B. (1979b). Qualitative analysis of the badminton forehand smash as performed by international players. *In* GROPPÉL, J. L., éditeur : *Proceedings of a National Symposium on the Racket Sports : an exploration of research implications and teaching strategies*, pages 1–16. University of Illinois, Urbana-Champaign. [253](#)

GOWITZKE, B. A. et WADDELL, D. B. (1979c). Technique of badminton stroke production : science in badminton. *In* TERAUDS, J., éditeur : *Racquet Sports*, pages 17–41. Del Mar, CA : Academic Publishers. [253](#)

JACKSON, S. L. et TANNER, E. A. (1993). Analysis of elite and novice disc golfers performing 10m putts. *In 11 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 368–370. [253](#)

JAITNER, T. et WOLF, G. (2007). Analysis of badminton smash with a mobile measure device based on accelerometry. *In XXV ISBA Symposium vol 20*, pages 282–284. [253](#)

KOMI, P. V. (1983). *Elastic potentiation of muscles and its influence on sport performance*. Verlag Karl Hofmann, Schomdorf, Germany, biomechani édition. [253](#)

LEE, B. K. (1993). The effects of the kinematic link principle on performance. *In 11 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 239–242. [253](#)

LEES, A. (2001). What biomechanics can tell the coach? *In IV World Coaching Conference*, pages 19–30, Valencia. [253](#)

- LEES, A. (2003). Science and the major racket sports : a review. *Journal of Sports Sciences*, 21(9):707–732. [253](#)
- PHOMSOUPHA, M., LAFFAYE, G., COHEN, C. et CLANET, C. (2015). How to use the elasticity of a badminton racket to increase its speed by 80%? *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 18(Suppl 1):2028–2029. [254](#)
- RASMUSSEN, J., KWAN, M., SKIPPER ANDERSEN, M. et de ZEE, M. (2010). Analysis of segment energy transfer using musculoskeletal models in a high speed badminton stroke. In *Proceedings of the 9th International Symposium on Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, pages 1–6. [252](#), [253](#)
- SAKURAI, S. et OHTSUKI, T. (2000). Muscle activity and accuracy of performance of the smash stroke in badminton with reference to skill and practice. *Journal of Sports Sciences*, 18(11):901–914. [253](#)
- SORENSEN, K., de ZEE, M. et RASMUSSEN, J. (2011). A biomechanical analysis of clear strokes in badminton executed by youth players of different skill levels. In *Congress of the International Society of Biomechanics*, page 2. [253](#)
- WADDELL, D. B. et GOWITZKE, B. A. (2000). Biomechanical principles applied to badminton power stroke. In *18 International Symposium on Biomechanics in Sports*, pages 1–6. [253](#)
- WAGNER, H., PFUSTERSCHMIED, J., TILP, M., LANDLINGER, J., von DUVILLARD, S. P. et MÜLLER, E. (2014). Upper-body kinematics in team-handball throw, tennis serve, and volleyball spike. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 24(2):345–354. [252](#), [253](#)





## Conclusion

Nous avons étudié les différents facteurs permettant de comprendre la grande vitesse du volant obtenue lors du smash. Le bras a souvent été étudié par les différents principes biomécaniques qui l'a régit (chaîne proximo-distale, adjonction des segments...). Nous avons cherché à comprendre l'importance de la longueur de la raquette et de son influence. La longueur du bras, complété avec la raquette permet d'augmenter la vitesse répondant au principe du bras de levier.

Une spécificité de la raquette de badminton réside dans sa capacité à se déformer lors d'une frappe. Nous avons pu observer que le stockage de l'énergie élastique dans la raquette (la tige) permet de restituer de l'énergie et ainsi d'augmenter la vitesse de la tête de raquette. Lors d'une synchronisation parfaite entre l'impact et le retour élastique, la vitesse obtenue sera optimisée. Un dernier facteur est le moment de contact entre la raquette et le cordage. Ce dernier joue un rôle prédéterminant puisqu'il peut aussi augmenter la vitesse du projectile.

Pour conclure, nous avons pu analyser et observer la contribution des différents facteurs dans la frappe en badminton. L'optimisation de ces paramètres peuvent augmenter la vitesse du volant. Cependant, certains paramètres ne peuvent évoluer comme la longueur de la raquette. La déflexion semble être l'un des facteurs offrant le plus grand bénéfice lors dans l'optimisation du matériel et de la vitesse du volant.



*“Il est plus facile de commencer quelque chose que d’y mettre fin.”*

Agnès Allen

## Conclusion générale

Au cours de cette thèse, nous avons travaillé sur plusieurs facteurs et d’optimisation de la performance sportive en badminton : la catégorisation de la vitesse du volant selon le niveau d’expertise corrélée avec un test anaérobie, l’influence de la fatigue et la capacité des joueurs à conserver une vitesse de volant importante durant tout le match avec la diminution de facteurs physiologiques et neuromusculaires et l’optimisation de la vitesse du volant avec l’interprétation d’un modèle physique expliquant les grandes vitesses. À chaque fois, nous sommes partis du terrain pour obtenir une classification et une première approche des déterminants de la performance. Nous avons élaboré des expériences proches des situations écologiques pour répondre à l’ensemble de nos interrogations.

### **Un nouveau test pour quantifier les améliorations des qualités de déplacements ?**

Afin de nous rendre compte des contraintes de la pratique en badminton, nous avons mis en place un test anaérobie permettant de reproduire les conditions d’un match de badminton. Cette expérimentation permet, par la même occasion, de catégoriser les vitesses de déplacement selon leur niveau d’expertise. Nous avons pu ainsi obtenir plusieurs résultats, le premier étant que les vitesses de déplacement sont corrélées avec l’expertise du joueur. Ainsi, un joueur expert se déplacera plus rapidement qu’un joueur novice. La fatigue engendrait par le test, diminue la vitesse de déplacement du début, jusqu’à la fin du test chez un joueur non initié. À l’inverse, un joueur expert pourra maintenir plus longtemps sa performance et la perte de vitesse étant moins importante.

### **Comment influence la fatigue au cours du match de badminton ?**

La mise en place d'un match prolongé nous a permis de mieux comprendre les demandes physiologiques, neuromusculaires, psychologiques, temporelles et notationnelles. Des joueurs experts ont réalisé un match d'une heure, entrecoupé toutes les 10 minutes d'un recueil de données. Au cours de cette étude, nous avons étudié la diminution des variables morphologiques au cours du temps et l'adaptation du système de jeu des joueurs afin de rester performants le plus longtemps possible. Les résultats ont montré une diminution progressive des facteurs neuromusculaires au cours des différentes sessions. Cependant, la conservation de la raideur durant tout le match montre la capacité de l'organisme des joueurs à pouvoir s'adapter afin de préserver la performance. Les facteurs physiologiques quant à eux ont montré les efforts importants et l'utilisation des différents facteurs métaboliques afin de fournir en continu de l'énergie. Les données psychologiques montrent que le temps du match est un élément influençant sur la perception de la fatigue des joueurs. La durée du temps de jeu joue un rôle dans la perception de la fatigue chez les joueurs.

### **La fatigue influence-t-elle la stratégie d'un match ?**

En complément, notre étude montre que la fatigue n'influence pas les fautes commises par les joueurs, montrant que les pratiquants arrivent à conserver au cours du match une grande "lucidité" ou un renforcement d'une stratégie connue et répétée. L'absence de modification tactique montre que les joueurs ont automatisé des schémas de jeu afin de remporter l'échange. Les joueurs utilisent des stratégies afin de récupérer. De plus, la modification des services et des trajectoires influence sur la vitesse des échanges entre les joueurs. Cette dernière est corrélée avec le temps de repos et influence grandement la fatigue des joueurs. Elle est une information de l'intensité de jeu et de la demande énergétique. Ainsi, la vitesse est un indicateur de performance.

### **Quels sont les outils pour obtenir la vitesse du volant ?**

Les avancées technologiques et les outils permettent d'enregistrer des vitesses de volant en badminton. Pour obtenir le meilleur équipement, nous avons choisi de comparer un radar-doppler et une centrale inertielle (gyroscope et accéléromètre) avec des caméras à haute vitesse de capture du mouvement. Nous avons étudié expérimentalement la

vitesse du projectile lors d'une frappe : le smash. Plusieurs athlètes de différents niveaux ont smashé un volant de badminton afin d'obtenir la plus grande vitesse. Les vitesses obtenues nous ont permis de les comparer entre les différents outils, afin d'analyser la validité et la reproductibilité. Les outils expérimentés ont montré une reproductibilité et une validité, cependant, les valeurs doivent être modifiées à travers un réajustement.

Chaque outil connaît des avantages et des inconvénients qui est important de souligner. L'avantage de la centrale inertielle est sa facilité d'utilisation et son absence d'apprentissage. Cependant, l'une des contraintes serait l'incapacité de ce dispositif d'enregistrer des vitesses supérieures à 325 km/h. À l'opposé, le radar quant à lui n'est pas limité par des vitesses, mais nécessite un apprentissage et amenant une répétition de la tâche lors de perte de données.

### **La vitesse du volant est-elle corrélée au niveau d'expertise ?**

En utilisant le radar, nous avons pu enregistrer plusieurs vitesses de volant. Pour se faire, nous avons demandé à des participants, du néophyte à l'expert de l'activité de réaliser plusieurs smashes. Nous avons ainsi pu recueillir et catégoriser les vitesses de volant selon le niveau d'expertise du joueur. Une corrélation montre que plus le joueur est expérimenté, plus la vitesse du volant sera importante.

Au cours de cette expérimentation, nous nous attendions à obtenir des vitesses semblables à partir des joueurs de niveau régional, soit un "plateau" avec les joueurs experts. Néanmoins, un résultat "inattendu" nous a montré que la vitesse continue de croître avec les joueurs experts. Ainsi, les joueurs experts utilisent et optimisent leurs frappes pour produire la plus grande vitesse.

### **Comment les joueurs produisent-ils de grandes vitesses à travers la raquette ?**

La vitesse de volant est générée lors de l'impact entre le volant et le cordage de la raquette. La conservation de la quantité de mouvement dépend de la vitesse de l'objet qui l'impacte, la raquette. Dans le cas d'un impact élastique comme en badminton, le rapport de vitesse est influencé par le coefficient de restitution entre le cordage et

le volant. Pour obtenir ce dernier paramètre entre le cordage et le volant, nous avons réalisé une expérimentation simplifiée nous permettant d'obtenir le rapport des vitesses.

### **La longueur de raquette influence-t-elle la vitesse du volant ?**

La longueur de la raquette est limitée selon le règlement de la Fédération Internationale de Badminton. Afin de comprendre la place de la longueur, nous avons mis en place une série de smashes avec des raquettes de tailles différentes. La raquette peut être considérée comme un segment supplémentaire du bras, augmentant le bras de levier de ce dernier. Cette augmentation segmentaire aura pour influence d'augmenter la vitesse au bout de la raquette. Nous avons pu observer que la vitesse de la raquette dépendait de la longueur de cette dernière.

### **Faut-il que la raquette défléchisse pour augmenter la vitesse ?**

La raquette de badminton est totalement différente des autres sports de raquette, elle se déforme et se défléchit. Pour comprendre cette déflexion, nous avons mené une expérimentation simple afin d'observer la déformation de la raquette à l'aide d'un vérin. Nous avons pu voir que l'accélération au niveau du manche produit une déflexion sur la tige de la raquette, permettant un stockage d'énergie élastique. Par la suite, il est restitué lorsque la tige reprend sa position initiale.

Afin d'influencer la déflexion, nous avons augmenté "artificiellement la masse" de la tête de la raquette. Dans le cas où le retour élastique de la tête raquette est parfaitement synchronisée avec l'impact du volant, la vitesse peut augmenter celle du projectile. Néanmoins, en modifiant la masse de la tête de raquette, la pulsation propre a été modifiée ainsi que le temps caractéristique permettant à la raquette de stocker l'énergie élastique lors de la phase d'accélération. De plus, l'expérience a été réalisée à une dimension et la complexité du mouvement du bras lors du smash ne nous permet pas d'obtenir les mêmes conditions sur la raquette.

Pour comprendre la contribution de la déflexion de la raquette, nous avons mis en place une expérimentation où nous avons simulé une raquette "rigide" à partir de la véritable raquette "flexible". Ce dispositif nous a permis de comparer la vitesse de la tête de raquette lorsque celle-ci est modifiée par la déflexion et lorsque celle-ci ne l'était

pas, mettant en avant le gain de vitesse obtenu grâce à la déflexion.

Pour maximiser la vitesse du volant, il faut maximiser la vitesse de la main du joueur et/ou de la raquette. En comparant la vitesse de la main des joueurs de badminton avec différents sports, nous avons obtenu des vitesses quasi équivalentes. Cependant, il semblerait que la vitesse de la raquette, grâce à la déflexion ne soit pas encore totalement optimisée permettant ainsi d'accroître la vitesse du volant.

### **Pronation et extension ? Quel mouvement pour produire la plus grande vitesse ?**

Lors du smash, le bras connaît plusieurs mouvements, une hypersupination et une pronation radio-ulnaire et une extension de l'avant-bras. Les mécanismes de la frappe sont complexes et il est difficile d'observer la contribution de chacun. Afin d'avoir une idée, nous avons mis en place une expérimentation où nous avons demandé à des joueurs de niveaux différents d'effectuer des mouvements isolés avec la raquette afin de recueillir les vitesses des différentes articulations et de la raquette de badminton.

Au cours de l'expérimentation, les novices ont de meilleurs résultats lors d'une extension à l'inverse des experts qui montrent de plus grandes vitesses lors d'une pronation. Cette dernière résulte d'un effet d'apprentissage, mais aussi d'un facteur de performance. Ainsi, il permet de se rendre compte du niveau d'un joueur. L'extension de l'avant-bras est familière à l'ensemble des participants avec une vitesse plus importante pour l'expert liée à l'optimisation du mouvement.

### **Dépassera-t-on un jour les 500 km/h ?**

En reprenant l'ensemble de nos principes, nous avons voulu comparer notre modèle avec le record du monde. Pour ce faire, nous avons recueilli la vitesse de la main de Tan Boon Heong et nous avons simulé la vitesse du volant que l'on obtiendrait. L'ensemble des principes était optimisé puisque nous sommes partis du postulat que l'expert exploitait au maximum l'ensemble de ses ressources. Obtenant des vitesses comparables, notre modèle reflète les principes mécaniques dans la production de cette grande vitesse.

À partir de notre modèle, nous avons pu nous rapprocher du record du monde. Cependant, un principe durant notre expérimentation n'a pas été optimisé, la déflexion de la raquette. Il est possible d'augmenter la déflexion de la raquette permettant d'augmenter davantage la vitesse du volant. Dans le cas où la déflexion est optimisée, l'augmentation de la vitesse du volant sera plus importante.

### **Quels ont été les apports aux concepts théoriques actuels en badminton ?**

À travers l'ensemble de ce travail doctoral, nous avons pour objectif de déterminer les discriminants de la performance sportive. La première approche a été de proposer un test anaérobie spécifique à l'activité, se concentrant sur la vitesse de déplacement et la conservation de la performance avec l'apparition de la fatigue. Afin d'approfondir l'impact de la fatigue, la conception d'un match prolongé nous a permis de faire émerger l'adaptation des tactiques des joueurs durant le match. De plus, un indicateur de performance, la fréquence des échanges montre une diminution de la vitesse. Ainsi, cette dernière est un facteur de performance permettant de comprendre les contraintes temporelles que les joueurs génèrent.

En comprenant la place importante de la vitesse au cours du match, nous avons cherché à comprendre si elle pouvait déterminer le niveau d'expertise. Au travers de cette hypothèse, des joueurs de tout niveau ont réalisé des smashes. En catégorisant les joueurs selon leur expertise et la vitesse produite, nous avons pu observer une augmentation des vitesses et une "absence" de limite. À partir de ce constat, il nous a été primordial de comprendre quelles étaient les stratégies du joueur pour créer une vitesse de volant aussi importante. La raquette de badminton joue un rôle primordial dans la réalisation de la frappe. Ainsi, cet artefact permet d'augmenter la vitesse du volant significativement.

### **Quels ont été les apports aux concepts théoriques actuels en science du sport ?**

Plusieurs concepts théoriques ont permis de comprendre la performance sportive en badminton. L'impact de la fatigue modifie les comportements moteurs des joueurs au cours du test spécifique. Afin de conserver la plus grande performance possible, les joueurs modifient les stratégies de déplacement. Cela a pour influence indirecte de di-

minuer la force de préhension des membres supérieurs. Les données neuromusculaires des membres inférieurs montrent quant à eux une diminution de la raideur, indicateur de performance permettant de se rendre compte de la fatigue. Le même constat est retrouvé durant le match prolongé, où la raideur diminue au cours du temps. Cependant, pour maintenir la performance, les joueurs adoptent de nouvelles stratégies pour limiter les effets de la fatigue neuromusculaire.

De plus, l'activité intermittente amène une haute demande énergétique que les joueurs maintiennent au cours du match, avec des valeurs de rythme cardiaque proche de 85 % de la valeur maximale. Des valeurs élevées contribuent à l'élimination du lactate. Celui-ci diminue au cours du match. L'organisme met en place des adaptations physiologiques freinant l'apparition et l'impact de la fatigue. La régénération de la phosphocréatine durant les temps de repos permet de conserver la performance.

La perception de la fatigue n'est pas seulement due au stress cardio-vasculaire et à la répétition des freinages, d'étirement-raccourcissement des muscles et des changements de direction. Toutes ces contraintes combinées à une dépense énergétique importante dans le maintien d'une grande concentration (tactique...), altère le self-contrôle (ego déplétion). Une haute demande physiologique et cognitive modifie la perception de la fatigue au cours du match.

Afin de comprendre au mieux les hautes vitesses produites par le volant en badminton, il nous a été indispensable de comprendre les différents mécanismes. De ce fait, nous avons cherché à modéliser les étapes de la création d'une grande vitesse. En reprenant le principe de conservation de la quantité de mouvement lors de la frappe, il est important de connaître le coefficient de restitution entre le volant et le cordage. Lors de la frappe, la vitesse de la raquette produit une vitesse importante sur le volant qui est rapidement freiné par les frottements de l'air sur les plumes.

La présence de la raquette joue un rôle dans la longueur de frappe. Ainsi, le bras de levier accentue l'augmentation de la vitesse de la raquette. Les propriétés de la raquette lui permettent de se défléchir et offrir une vitesse supplémentaire par le stockage et le renvoi de l'énergie élastique de la tige. L'analyse de la tige nous a permis d'observer

qu'elle n'était pas totalement optimisée, ne restituant pas l'énergie maximale qu'elle pouvait fournir. Cependant, cela nécessiterait une modification du temps caractéristique de frappes du joueur.

La vitesse dépend de la vitesse de bras du pratiquant. Les joueurs sont capables de générer une grande vitesse lors d'une frappe avec une synchronisation de leur chaîne segmentaire. La vitesse de l'avant-bras est soumise à la tension du cycle étirement-renvoi lors de l'hypersupination. Cette dernière est maîtrisée par les experts qui exploitent les propriétés élastiques du muscle afin de produire la plus grande vitesse de main.

## **Limite durant le travail doctoral**

L'ensemble de ce travail doctoral présente un certain nombre de limites qu'il convient de souligner. Durant l'élaboration du protocole expérimental et des prétests, certaines limites n'ont pas eu la possibilité d'être résolues.

Tout d'abord, ce travail doctoral a étudié la vitesse du volant comme indicateur de performance et d'expertise. Durant les études de la première partie, les résultats étaient inconsistants pour certains niveaux de joueur. Des joueurs débutants en badminton pouvaient obtenir des vitesses importantes selon leur "passif sportif" proche des joueurs expérimentés. De même, certains joueurs experts ont des vitesses inférieures à leur niveau de catégorisation. Les joueurs s'appuient et développent leurs points forts, les amenant à adapter un style de jeu personnel. Ainsi, les pratiquants ayant un niveau d'expertise important, mais n'ayant pas une grande vitesse de volant peuvent être présents dans notre étude. Montrant la diversité des styles de jeu, et d'une catégorisation globale des joueurs selon leur expertise.

De même lors du test physique, certains joueurs commençant l'activité pouvaient aussi avoir des performances proches des hauts classements. Le passif sportif du pratiquant joue un rôle essentiel dans l'interprétation du test. De plus, des profils de joueurs explosifs et/ou endurants modifient les résultats, quel que soit le niveau.

Lors de l'étude des demandes morphologiques durant un match prolongé afin de maintenir un haut niveau de performance, les stratégies de récupération des joueurs

influencent nos valeurs recueillies après chaque session. Les échanges intenses peuvent se situer bien en amont de la récolte des données ne permettant pas d'avoir de manières précises la demande énergétique du moment. Le nombre important de tests avait pour incidence de donner un temps de récupération supplémentaire aux participants, modifiant les valeurs obtenues. Les facteurs psychologiques n'ont pas été totalement pris en compte lors de la confrontation. Le rapport de force (gain ou perte) joue un rôle dans la performance sportive du joueur. Nous avons cherché à mettre en confrontation des joueurs de même niveau, cependant, l'impact du rapport de force modifie les demandes physiologiques et neuromusculaires.

Lors de notre dernière étude sur l'optimisation et la modélisation de la frappe en badminton, les travaux sur la déflexion de la raquette s'appuient essentiellement sur un seul type de raquette. En modifiant les caractéristiques d'élasticité, de répartition de masse et de masse de la raquette, il est possible comme nous l'avons réalisé, de modifier la déflexion de la raquette. Cependant, cette limite pourrait être résolue en utilisant une gamme de raquettes plus importante et variée. De même que le cordage de la raquette influence le coefficient de restitution, nous avons fait le choix de conserver la même tension et type de cordage afin d'obtenir des valeurs comparables entre l'ensemble des participants.

### **Perspectives de recherche**

Malgré ces différentes limites, des perspectives intéressantes émergent de ce travail de recherche. Ainsi, pour souligner la richesse inépuisable du contexte sportif, nous pouvons citer des ouvertures nombreuses sur ce champ.

### **Quelles applications dans le contexte sportif?**

Les joueurs de badminton utilisent le système de classement afin de s'évaluer et d'observer leur progression au cours d'une saison. Cependant, de nouveaux dispositifs permettent d'analyser ses propres performances à partir d'application sur son smartphone. Ces évolutions technologiques mettent en avant de nouveaux types d'entraînements, mais aussi une nouvelle approche avec des informations supplémentaires.

La création de nouvelles applications dans diverses activités permettant de se rendre compte des progressions et des évolutions des joueurs peut être envisagée. Les outils technologiques peuvent être des “feedbacks” rapides pour le joueur et pour les entraîneurs. Ils sont facilement transportables, utilisables et fiables permettant de donner des indications pertinentes sur la séance d’entraînement, voir durant un match. L’intégration de nouvelles données peut augmenter la richesse de ces outils technologiques offrant des possibilités et des remédiations rapides et efficaces.

Ainsi, les applications offrant des retours directes sur la performance sont un moyen de contrôle de l’amélioration de la performance sportive chez les joueurs. De plus, notre validation d’outil peut permettre d’évaluer les différentes vitesses dans d’autres activités comme le baseball, le tennis et le golf. Un même concept de la centrale inertielle pourrait émerger pour la fabrication d’outil d’identification de la vitesse dans d’autres activités comme le handball et le volley-ball.

### **Une première approche de la performance durant un match**

Tout au long de notre étude, nous avons pu voir que les joueurs adaptaient leur comportement afin d’augmenter leur temps de récupération au cours du match. Cela nous a permis de comprendre comment fonctionnent les demandes physiologiques et neuromusculaires des joueurs et l’adaptation des tactiques de frappes des joueurs. Cette première approche sur le badminton pourrait être réutilisée dans différentes activités comme le basket, le football et le handball. L’évolution des caractéristiques physiologiques et neuromusculaires et l’impact de la fatigue sur le joueur et ses performances peuvent être envisagés selon le poste. Ainsi, il serait possible de catégoriser la fatigue dans les diverses activités. De plus, une étude approfondie de chaque joueur permettrait aux entraîneurs de pouvoir axer et repousser le plus tardivement possible la fatigue et son influence afin de conserver la performance sportive.

Ces connaissances du joueur vont permettre de comprendre et d’optimiser les capacités physiologiques et neuromusculaires souvent trop peu exploitées et ainsi orienter des entraînements spécifiques. Les demandes neuromusculaires sont certainement différentes selon les activités, cependant, il serait important d’analyser les adaptations des joueurs à travers l’impact de la fatigue. Elle pourra être retardée et permettre aux

joueurs de repousser les difficultés neuromusculaires et optimiser les demandes physiologiques à travers d'entraînements spécifiques.

De plus, il serait intéressant de pouvoir reproduire une expérimentation sur la fatigue accumulée durant un tournoi complet, des phases de poule aux phases finales afin d'observer le temps de récupération nécessaire pour le joueur et l'équipe afin de diminuer et préserver les contraintes de la succession des matchs.

### **Vers une meilleure compréhension de la raquette de badminton...**

Au travers de nos études sur la raquette, nous avons cherché à comprendre l'influence que pouvait avoir la déflexion sur la vitesse produite par le volant. Notre modèle met en avant des principes provenant du contexte écologique. Partis d'interrogation simple, nous avons mis en exergue le fonctionnement de la raquette de badminton. L'évolution de la technologie et du matériel pourront augmenter la vitesse du volant ou à partir de nos principes optimiser la raquette de badminton.

De plus, il existe des dizaines et des dizaines de raquettes de badminton, de diverses marques, de diverses technologies et de diverses fabrications. Au travers de l'ensemble de ces indicateurs, il est difficile pour le sportif de se retrouver et de faire le bon choix sans être influencé. Les raquettes semblent être conçues selon des caractéristiques générales permettant à chacun d'optimiser au maximum sa performance. Cependant, un mauvais choix de raquette peut amener une perte de vitesse de volant. Évaluer et catégoriser des raquettes afin de permettre à chaque joueur d'optimiser sa frappe seraient le meilleur moyen de mettre à profit la raquette au service du joueur. Nos études ne se sont intéressées qu'à une seule raquette, mais elles sont reproductibles afin de catégoriser une plus large gamme de raquettes.

Nos premières recherches sur l'optimisation de la vitesse peuvent être extrapolées sur l'ensemble des sports de raquette. La compréhension de l'influence de la raquette sur la frappe et sur la vitesse du projectile est primordiale dans la production de performance. De plus, cela influencera par la suite le style de jeu, rendant l'activité plus rapide et

demandant de nouvelles améliorations physiologiques et neuromusculaires des joueurs.

Pour conclure, ce travail de recherche n'a pas la prétention de résumer une activité physique selon des critères physiologiques, neuromusculaires et physiques. Au contraire, il cherche à mettre en avant des indicateurs permettant aux entraîneurs et aux joueurs de pouvoir se situer et d'observer une progression. De plus, cela permet la mise en place de nouveaux protocoles expérimentaux pour déterminer les éléments de performance dans les diverses activités. Ouvrant différents axes de recherche vers plusieurs compréhensions des déterminants et des variables optimisant la performance en sport.





# Liste des figures

1	Évolution du château du Badminton House au cours des siècles . . . . .	3
2	Évolution du nombre de licenciés (données provenant de la FFBaD - Poona) . . . . .	4
3	Chronophotographie d'une frappe en badminton . . . . .	5
6	Démarche scientifique au cours de ce travail doctoral . . . . .	7
1.1	Apparition du volant de badminton dans les années 1800 . . . . .	9
1.2	Différents types de volants de badminton . . . . .	10
1.3	Application des différentes forces sur un volant . . . . .	10
1.4	Chronophotographie d'un volant en sortie de raquette selon Cohen <i>et al.</i> [2014] . . . . .	11
1.5	Impact entre l'impacteur (raquette) et l'impacté (projectile) . . . . .	13
1.6	Trajectoire d'un ballon et d'un volant selon Cohen <i>et al.</i> [2014] . . . . .	14
1.7	Visualisation des filets d'air d'un volant, image provenant de Rob Bulmahn	17
1.8	Valeur expérimentale durant une chute libre d'un volant selon Paestrel <i>et al.</i> [1980] . . . . .	18
1.9	Le titre obtenu par Tan Boon Heong pour le succès du projectile le plus rapide . . . . .	18
1.10	Chronophotographie d'un smash revers de Taufik Hidayat . . . . .	19
1.11	Salle de capture de mouvement avec des caméras à haute vitesse . . . . .	21
1.12	Outils expérimentaux utilisés pour enregistrer et mesurer la vitesse . . .	21
1.13	Raquette équipée de marqueurs réfléchissants . . . . .	23
1.14	Blant-Altman entre le radar et la caméra à haute vitesse . . . . .	30
1.15	Blant-Altman entre le radar et la caméra à haute vitesse . . . . .	30
1.16	Correction des valeurs pour chaque matériel . . . . .	32

2.1	Exemple d'un terrain vu de côté et zone d'impact pour générer une trajectoire descendante . . . . .	49
2.2	Exemples des différents types de somatotypes . . . . .	53
2.3	Somatotype moyen des hommes représenté par le Heath-Carter somato-charte en badminton . . . . .	55
2.4	Organisation temporelle des différents recueils de données . . . . .	64
2.5	Déplacements (en bleu) et replacements (en vert) selon l'ordre prédéfini (1 à 4) . . . . .	65
2.6	Corrélation entre le premier essai et le second essai . . . . .	67
2.7	Évolution du lactate pré- et post-test . . . . .	68
2.8	Hauteur des différents sauts pré- et post-test . . . . .	69
2.9	Évolution de la force de préhension pré- et post-test . . . . .	70
2.10	Perception de l'effort central et périphérique pré- et post-test . . . . .	71
2.11	Temps du début et à la fin du test et temps moyenné selon le niveau . . . . .	72
2.12	Évolution des temps entre chaque essai du test . . . . .	73
2.13	Index de fatigue et pourcentage de perte . . . . .	73
2.14	Fréquences moyennes des appuis selon le niveau . . . . .	74
2.15	Vitesse de volant selon le niveau lors du test MRSAB . . . . .	74
2.16	Temps moyens mis pour atteindre chaque cible selon le niveau . . . . .	83
3.1	Organisation temporelle des différents recueils de données . . . . .	123
3.2	Exemple des différents sauts . . . . .	124
3.3	Matériels utilisés pour le recueil des données neuromusculaires . . . . .	125
3.4	Échelle de la perception de l'effort . . . . .	125
3.5	Évolution du lactate sanguin au cours des différentes sessions . . . . .	127
3.6	Évolution de la puissance des membres inférieurs . . . . .	127
3.7	Évolution de la FE au cours des sessions . . . . .	129
3.8	Exemple d'une reprise d'appui selon Laffaye [2011] . . . . .	131
3.9	Joueur épuisé après un échange en badminton . . . . .	133
3.10	Transpiration d'un joueur de badminton durant un match . . . . .	134
3.11	Évolution de la force de la main et des doigts . . . . .	134
3.12	Abandon d'un joueur dû à la fatigue durant le match . . . . .	137

3.13	Évolution de la perception de l'effort des membres inférieurs et cardio-vasculaire au cours des sessions . . . . .	139
4.1	Record du monde des différentes vitesses de projectile dans différents sports . . . . .	159
4.2	Design de l'expérimentation . . . . .	162
4.3	Vitesse du volant selon le niveau d'expertise durant un smash . . . . .	163
4.4	Évolution de la vitesse du volant au cours du temps durant un smash . . . . .	165
4.5	Relation linéaire entre la vitesse inversée et le temps . . . . .	166
5.1	Illustration d'un cordage rompue . . . . .	171
5.2	Compositions et propriétés de différents cordages . . . . .	172
5.3	Gamme de cordage mettant en avant la puissance de répulsion . . . . .	172
5.4	Gamme de cordage mettant en avant la durabilité . . . . .	173
5.5	Gamme de cordage mettant en avant le son et le contrôle . . . . .	173
5.6	Impact entre la raquette de masse $m_1$ et de vitesse $v_1$ et le volant de masse $m_2$ et de vitesse $v_2$ . . . . .	174
5.7	Dispositif expérimental pour calculer le coefficient de restitution $e$ . . . . .	177
5.8	Résultat du coefficient de restitution . . . . .	178
5.9	Vitesse après impact sur vitesse avant impact . . . . .	178
6.1	Description simplifiée de différentes raquettes . . . . .	185
6.2	Déformation de la tige de la raquette lors d'un smash . . . . .	185
6.3	Demoiselles japonaises pratiquantes de l'Hagoita, l'Oibane et le Tsubi-kane durant la fin du 19 <sup>ème</sup> siècle . . . . .	186
6.4	Représentation du jeu et de la raquette utilisée durant le "Jeu de Paume" . . . . .	187
6.5	"Anatomie" d'une raquette de badminton . . . . .	188
6.6	Frappe en badminton : phase d'armement (image 1-3) ; phase d'accélération (image 4-6) ; contact (image 7) ; phase d'accompagnement (image 8-10) . . . . .	189
6.7	Déflexion "négative" de la raquette lors de la phase d'accélération du mouvement . . . . .	190
6.8	Accélération du manche de la raquette avec un vérin avec ou sans masse sur la raquette . . . . .	191
6.9	Dynamique de la raquette lors de l'expérience avec le vérin . . . . .	192

6.10	Dynamique de la raquette lors de l'expérience avec le vérin avec une masse de $m = 88$ g . . . . .	193
6.11	Dynamique de la raquette lors de l'expérience avec le vérin avec une masse de $m = 176$ g . . . . .	194
6.12	Evolution des différents rapports des vitesses maximales avec le rapport $\omega/\omega_0$ , où $\omega_0$ est la pulsation propre de la raquette et $\omega = \pi/\tau$ est la pulsation de la vitesse avec un vérin . . . . .	195
6.13	Prédiction des vitesses maximales en fonction de la pulsation selon [Cohen, 2015] . . . . .	196
6.14	Exemple de différentes raquettes selon des caractéristiques multiples . . . . .	198
6.15	Déflexion de la raquette . . . . .	198
6.16	Raquette de badminton, équipée de marqueurs réfléchissants . . . . .	200
6.17	Déflexion de la raquette en fonction de l'accélération de la main . . . . .	201
6.18	Influence de la déflexion sur la raquette . . . . .	202
6.19	Évolution de la vitesse du volant $v_{volant}$ en fonction de la vitesse de la raquette $v_{raquette}$ . . . . .	202
7.1	Mouvements anatomiques du bras . . . . .	216
7.2	Séquence proximo-distal des différents segments lors d'une frappe . . . . .	217
7.3	Comparaison entre les différentes phases de frappe . . . . .	222
7.4	Comparaison de la longueur du bras et de la raquette . . . . .	223
7.5	Utilisation de différentes tailles de raquette durant l'expérience . . . . .	224
7.6	Influence de la longueur de bras et de la raquette sur la vitesse de la raquette et de la main . . . . .	226
7.7	Mouvement d'extension et de pronation . . . . .	229
7.8	Raquette de badminton équipée de marqueurs réfléchissants . . . . .	230
7.9	Vitesse et accélération des différents mouvements et niveaux . . . . .	232
7.10	Temps de mouvement d'extension et de pronation . . . . .	233
7.11	Angle balayé durant une extension et une pronation . . . . .	233
7.12	Déflexion de la raquette selon le niveau d'expertise et le mouvement . . . . .	234
7.13	Mouvement d'extension et de pronation . . . . .	236
8.1	Facteurs de performance dans la production de vitesse d'un volant, modèle prédictif . . . . .	251

8.2 Annonce par Yonex du record du monde . . . . . 252

# Liste des tableaux

1.1	Comparaison des coefficients de restitution dans les différents sports de raquette (Laffaye, 2013) . . . . .	13
1.2	Anthropométrie des joueurs lors de l'expérience . . . . .	22
1.3	Vitesse du volant selon le radar, la centrale inertielle et la caméra à haute vitesse . . . . .	26
1.4	Fiabilité du matériel à travers le coefficient de corrélation intra-classe relatif et le coefficient de variation absolue obtenu à l'aide du radar, de la centrale inertielle et du système de caméra à haute vitesse . . . . .	27
1.5	Vitesse du volant obtenue avec le radar, la centrale inertielle et la caméra à haute vitesse . . . . .	27
1.6	Validité du matériel à travers le coefficient de corrélation intra-classe relatif et le coefficient de variation absolue obtenu à l'aide du radar, de la centrale inertielle et du système de caméra à haute vitesse . . . . .	28
2.1	Synthèse des études portant sur les caractéristiques anthropométriques générales des joueurs de badminton . . . . .	57
2.2	Résumé des études faisant état des caractéristiques anthropométriques	58
2.3	Résumé des études faisant état des somatotypes de 1 à 7 . . . . .	58
2.4	Anthropométrie des joueurs . . . . .	61
2.5	Fréquence cardiaque moyenne et maximale . . . . .	68
2.6	Résultats des variables neuromusculaires . . . . .	70
2.7	Résultats de la raideur . . . . .	77
2.8	Nombre d'appui moyen et total durant le test . . . . .	80
2.9	Temps moyen et perte (%) lors du premier et le second d'un essai . . . . .	82
3.1	Moyenne des différentes études analysants les variables temporelles . . . . .	108

3.2	Distribution des différentes frappes durant un match de badminton . . .	111
3.3	Résultat comparatif dans l'obtention du gain de l'échange au cours d'un match de badminton . . . . .	112
3.4	Tableau récapitulatif des demandes physiologiques en badminton . . . .	115
3.5	Analyse urinaire pré- et post- match . . . . .	119
3.6	Anthropométrie des joueurs lors de l'expérience . . . . .	122
3.7	Analyse temporelle et notationnelle durant chaque session . . . . .	129
4.1	Caractéristiques anthropométriques . . . . .	161
7.1	Paramètres biomécaniques de joueurs de badminton . . . . .	215
7.2	Angle de l'épaule, du coude et du poignet lors de différentes frappes . .	219
7.3	Vitesse angulaire de l'épaule, du coude et du poignet lors de différentes frappes . . . . .	221
7.4	Anthropométrie du joueur lors de l'expérience . . . . .	224
7.5	Caractéristiques anthropométriques des participants . . . . .	228

# Acronymes

- ANOVA** Analyse de la Variance 126, 231
- ATP** Adénosine Triphosphate 118, 132, 133
- CIO** Comité Internationale Olympique 213
- CMJ** Contre Mouvement Jump 123, 124, 126, 127, 131, 132
- CV** Coefficient de Corrélacion 25–29
- DD** Double Dame 108
- DE** Durée de l'échange 107, 108, 136
- DH** Double Homme 108
- DR** Durée du temps de repos 107
- F/E** Frappes par échange 107, 108, 128
- FC** Fréquence Cardiaque 116, 118, 126, 130
- FD** Faute Directe 112, 125
- FE** Fréquence des échanges IV, 107–109, 125, 128–130, 135–137
- FFBaD** Fédération Française de Badminton xii, III
- FP** Faute Provoquée 111, 112, 125
- ICC** Intra-Classe Corrélacion 24–29
- ISB** Société Internationale de Biomécanique 225
- JO** Jeux Olympiques xii, 110–112, 136
- LS** Saut Rebond 123
- MRSAB** Multidirectional Repeated Sprint Ability for Badminton xiv

**Mx** Mixte 108

**PD** Point Direct 112, 125

**PhCr** Phosphocréatine 130, 132, 133

**SD** Simple Dame 108, 111

**SH** Simple Homme 108, 111

**SJ** Squat Jump 123, 124, 126, 127, 131, 132

**TJE** Temps de jeu effectif 107, 108, 125, 128, 135, 136

**UNSS** Union Nationale du Sport Scolaire xii

**WD** Work density 107, 108

## Résumé

**Titre :** Déterminants biomécanique, physiologique et modélisation physique de la performance en badminton.

Tout comme l'entraînement, la recherche en science du sport est un facteur déterminant de la performance sportive. À travers l'étude d'une activité physique intermittente, le badminton, le prisme des concepts biomécaniques, physiologiques et physiques convergent vers une approche pluridisciplinaire des déterminants de la performance sportive. Ainsi, l'objectif de l'ensemble de ce travail doctoral est, à la fois, la prédiction de la performance en badminton et la compréhension des mécanismes de production d'une vitesse de volant proche des 500 km/h. Les réponses physiologiques et neuromusculaires ont permis la mise en place d'un test discriminant spécifique, prédictif du niveau d'expertise, et proche des situations écologiques d'un match. Paradoxalement, les causes des mécanismes neurophysiologiques liés à la fatigue induite lors d'un match prolongé restent toutefois inconnues. Il apparaît primordial d'approfondir les dits mécanismes vraisemblablement à l'origine de la diminution de la performance sportive. Les évolutions des observables de match, de la force maximale et de la puissance des membres supérieurs et inférieurs convergent vers une diminution progressive au cours de la pratique. Corollairement, la compréhension des mécanismes d'optimisation de la vitesse du volant a permis de mettre en exergue des principes biomécaniques et physiques déterminant lors de la prédiction d'une grande vitesse de volant lors d'une performance maximale. En effet, les principes d'adjonction des segments et d'étirement-renvoi influencent largement la vitesse de la main. En complément, le principe de bras de levier et l'effet élastique de la raquette permettent également d'accroître la vitesse de la raquette. Enfin, la conservation de la quantité de mouvement et le coefficient de restitution contribuent finalement à la vitesse du volant.

**Mots-clés :** performance, badminton, biomécanique, neurophysiologie, physique, raquette

## Summary

**Title :** Biomechanical, physiological determinants and physical modeling of performance on badminton.

Just like training, sport science research is a key factor in sports performance. Through the study of intermittent physical activity, in this case badminton, biomechanical, physiological and physical concepts emerge and offer a multidisciplinary approach of the determinants of sport performance. Thus, the goal of this doctoral work is both the study of badminton in the performance prediction and the understanding of the mechanisms in the production of wheel velocity close to 500 km/h. The physiological and neuromuscular responses enabled the establishment of a specific discriminatory test, predicting the level of expertise, and close to the ecological conditions of a match. Paradoxically, the causes of neurophysiological mechanisms associated with the fatigue induced by a prolonged game remain unknown. It appears heuristic to further study those mechanisms which are at the origin of a decrease in athletic performance. The evolution of observable match variables, the maximum strength and the power of the upper and lower limbs converge towards a gradual decrease in the practice. As a corollary, the understanding of the optimisation of the speed of the flywheel mechanisms helped to highlight the biomechanical and physical principles, essential in predicting a large wheel speed during a maximum performance. Indeed, the principles of adding segments and stretching shortening cycle largely influence the speed of the hand. In addition, the principle of the lever arm and the elastic effect of the racket also increase the speed of the racket. Finally, the conservation of the momentum and the restitution coefficient ultimately contribute to the speed of the shuttlecock.

**Keywords :** performance, badminton, biomechanic, neurophysiology, physic, racket