

THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE RENNES 2

COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

ECOLE DOCTORALE N° 603

Education, Langages, Interaction, Cognition, Clinique

Spécialité : STAPS

Par

Pierre TOUZARD

L'évolution biomécanique du service des jeunes joueurs de tennis élités : identification des facteurs de performance et de risque de blessures

Thèse présentée et soutenue à Université Rennes, le 29 Janvier 2021

Unité de recherche : Laboratoire M2S – EA 7470

Composition du Jury :

Isabelle ROGOWSKI	Maître de conférences (HDR), Université Lyon 1 / Rapportrice
Jean-Benoît MORIN	Professeur des universités, Université de Saint-Étienne / Rapporteur
Patricia THOREUX	Professeur des universités – Praticien Hospitalier, Université Sorbonne Paris Nord / Examinatrice
Delphine CHADEFaux	Maître de conférences, Université Sorbonne Paris Nord / Examinatrice
Benoît BIDEAU	Professeur des universités, Université Rennes 2 / Directeur de thèse
Richard KULPA	Maître de conférences (HDR), Université Rennes 2 / Co-directeur de thèse



UNIVERSITÉ RENNES 2 – HAUTE BRETAGNE
Unité de Recherche
Ecole Doctorale - Humanités et Sciences de l'Homme

Sous le sceau de l'Université Bretagne Loire

L'évolution biomécanique du service des jeunes joueurs de tennis élites : identification des facteurs de performance et de risque de blessures

Thèse de Doctorat

Discipline : STAPS

Présentée par Pierre TOUZARD
Soutenue le 29 Janvier 2021

Jury :

Mme Isabelle ROGOWSKI,	Maître de conférences (HDR), Université Lyon 1 (Rapportrice)
Mr Jean-Benoît MORIN,	Professeur des universités, Université de Saint-Étienne (Rapporteur)
Mme Patricia THOREUX,	Professeur des universités – Praticien Hospitalier, Université Sorbonne Paris Nord (Examinatrice)
Mme Delphine CHADEFaux,	Maître de conférences, Université Sorbonne Paris Nord (Examinatrice)
Mr Benoît BIDEAU,	Professeur des universités, Université Rennes 2 (Directeur de thèse)
Mr Richard KULPA,	Maître de conférences (HDR), Université Rennes 2 (Co-directeur de thèse)

Remerciements

Je remercie tout d'abord Isabelle Rogowski et Jean-Benoît Morin d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Je remercie aussi Patricia Thoreux et Delphine Chadefaux de faire partie de mon jury. Je remercie également Cyril Brechbühl, entraîneur national et référent scientifique à la Fédération Française de Tennis, d'avoir répondu favorablement à notre invitation pour cette soutenance de thèse.

Je remercie Benoît Bideau, directeur de cette thèse, pour son encadrement, pour la confiance qu'il m'a accordée et pour m'avoir permis de vivre cette expérience universitaire unique tout en continuant d'exercer mon métier d'entraîneur de tennis. J'ai aussi des remerciements plus particuliers à lui adresser puisque c'est lui qui a éveillé ma curiosité pour la recherche lors de ma 2^{ème} année de STAPS. Je me souviens très bien de son enthousiasme lorsqu'il présentait à ses étudiants les projets de biomécanique liés à l'optimisation de la performance du sportif de haut niveau, et notamment ceux concernant le joueur de tennis. Cette aventure a réellement commencé pour moi à cet instant.

Je remercie Richard Kulpa, co-directeur de cette thèse, pour ses conseils avisés, son suivi précieux et peut être encore plus pour ses qualités humaines. Richard a été un formidable exemple de ce que je poursuis en tant qu'entraîneur de tennis, à savoir être capable d'associer rigueur de travail avec bonne humeur constante et d'alterner les mots réconfortants avec les mises au point plus directes. Il a été un formidable encadrant pour moi.

Je remercie très chaleureusement Caroline Martin, maître de conférences et responsable scientifique de ce projet, pour l'ensemble des heures passées à échanger, à m'orienter, à me corriger, à expérimenter avec moi aussi. Les grandes compétences scientifiques et tennistiques de Caroline m'ont permis d'apprendre énormément à ses côtés. J'espère que nous pourrons continuer à travailler ensemble.

Je remercie tous les membres du laboratoire pour leur gentillesse et pour leur aide, surtout envers un étudiant qui devait parfois vite s'échapper pour aller remettre sa casquette d'entraîneur de tennis.

Je remercie la Fédération Française de Tennis d'avoir accepté d'être partenaire de ce projet, et plus particulièrement le Docteur Bernard Montalvan, directeur adjoint en charge du médical et médecin de l'équipe de France de Coupe Davis, et Annie Riquet, cadre technique national, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail. Je remercie aussi la Ligue de Bretagne de Tennis et notamment sa vice-présidente Danielle Autin, dirigeante passionnée et passionnante, qui nous a confié plusieurs « irréductibles bretonnes » qui avaient l'envie de perfectionner leur technique de service.

Je remercie évidemment les joueurs et joueuses, parfois très jeunes, qui ont pris part aux expérimentations de ce travail. Je leur souhaite à tous d'atteindre les objectifs qu'ils se sont fixés et de réaliser les rêves qu'ils poursuivent. Conjointement, je remercie tous les entraîneurs qui les ont accompagnés, certains avec quelques a priori sur le « monde de la recherche », mais tous avec ce mélange de convictions et d'ouverture d'esprit qui fait la qualité des grands entraîneurs. Ce travail reflète aussi la richesse de nos échanges.

Le tennis prend une place prépondérante dans ma vie, et la réalisation de ce travail en est un bon exemple. Aussi, je tiens à remercier profondément les deux entraîneurs qui m'ont appris bien plus que ce qu'ils ne peuvent imaginer. Merci d'abord à Jean-François, mon

entraîneur pendant plus de quinze années ou de façon plus juste mon « formateur » de toujours. Je n'oublierai jamais tout ce que je lui dois. Je remercie aussi Yann, qui avec la modestie et la réserve qui le caractérisent, me demanderait à coup sûr de ne pas parler de lui. Je ne mentionnerai donc pas cette première rencontre au Val-André qui ne restera pas un bon souvenir pour moi (une défaite en moins d'une heure). Je m'abstiendrai également sur tout le reste, depuis qu'il m'a fait découvrir une autre façon de voir le tennis jusqu'à ce qu'il devienne tour à tour un dirigeant me proposant d'enseigner dans son club de toujours, un partenaire d'entraînement imbattable, un coéquipier d'équipe irréprochable, un binôme de double qui compte pour deux, un collègue qui amène indirectement à se remettre en question, et avant tout un ami. J'espère qu'il saura me pardonner cette prétention.

J'en profite pour remercier très sincèrement mon club de l'AT Betton, et plus particulièrement les membres du bureau qui m'ont toujours facilité les choses et encouragé dans mon projet. Par la même occasion, je remercie tous les joueurs et les joueuses que j'ai entraînés ou plutôt qui ont réussi à me supporter durant ces années. J'ai évidemment une pensée spéciale pour « mon groupe de filles » ainsi que pour mes partenaires d'équipe qui m'ont fait vivre des moments humains et sportifs inoubliables. Quel bonheur de faire partie de ce club !

Enfin, je remercie mes proches de tout mon cœur. Ils n'ont pas besoin de beaucoup de mots pour savoir ce qu'ils représentent pour moi. Je pense d'abord à ma maman et mon papa, ma sœur Emma et son mari Thomas. Je pense aussi à mes amis Pierre, Alexis, Sam, Charles-Antoine, Carole, Briac, Lucas, Bastian, Nicolas, Aymeric, Maxime, Quentin, Augustin, Laure et tous ceux qu'il m'a été plus difficile de revoir ces derniers temps. Je termine avec une pensée très affectueuse pour mes neveux Louis et Mathilda, deux rayons de soleil apparus pendant la réalisation de ce travail. Quand vous serez en âge de lire ces quelques lignes, sachez que votre sourire me donne une énergie incroyable et que je serai là pour vous accompagner tout au long de votre parcours, tennistique ou pas.

Table des matières

1	Introduction	9
2	Revue de littérature	13
2.1	L'importance du service chez les joueurs et joueuses de tennis élités	13
2.1.1	Un coup fondamental dans la performance des joueurs et des joueuses adultes	13
2.1.2	Un coup en construction chez les jeunes joueurs élités.....	16
2.1.3	La vitesse de balle	17
2.2	L'analyse biomécanique du service pour optimiser la performance	25
2.2.1	Objectifs et intérêt de l'analyse biomécanique	25
2.2.2	Analyse cinématique de la première balle de service	26
2.2.3	Analyse dynamique de la première balle de service	40
2.3	L'analyse biomécanique du service pour diminuer le risque de blessures chroniques.....	43
2.3.1	Épidémiologie des blessures au tennis	43
2.3.2	Les blessures chroniques spécifiques des jeunes joueurs et joueuses élités.....	51
2.3.3	Étiologie des blessures au tennis.....	57
3	Synthèse et objectifs.....	71
4	Méthodologie générale.....	73
4.1	Déroulement	73
4.2	Participants	74
4.3	Capture de mouvement en 3D	74
4.4	Protocole expérimental.....	78
4.5	Vitesse de balle	79
4.6	Analyse cinématique.....	79
4.7	Analyse dynamique.....	80
4.8	Recueil des données sur les blessures	81
5	Étude 1 : Influence de l'âge et du sexe sur les paramètres cinématiques et dynamiques du service de jeunes joueurs et joueuses élités	83
5.1	Introduction	83
5.2	Méthodologie.....	84
5.2.1	Participants	84
5.2.2	Protocole expérimental.....	85
5.2.3	Analyses statistiques	86
5.3	Résultats	86
5.3.1	Influence de l'âge chez les garçons.....	86
5.3.2	Influence de l'âge chez les filles.....	90
5.3.3	Influence du sexe	94

5.3.4 Blessures.....	97
5.4 Discussion	98
5.4.1 Comparaison de la vitesse du service avec les données de la littérature.....	98
5.4.2 Évolution du service en fonction des catégories d'âge.....	99
5.4.3 Influence du sexe sur la biomécanique du service.....	107
5.4.4 Résultats préliminaires	110
5.4.5 Limites et perspectives	115
5.4.6 Recommandations pratiques aux entraîneurs et aux joueurs.....	116
5.5 Conclusion.....	122
6 Étude 2 : Influence du type d'appuis sur la performance et les risques de blessures au service des jeunes joueurs et joueuses élites	125
6.1 Introduction	125
6.2 Méthodologie générale.....	128
6.2.1 Population de l'étude.....	128
6.2.2 Protocole expérimental.....	130
6.2.3 Analyses statistiques	130
6.3 Résultats	131
6.3.1 Comparaison du service avec et sans relais d'appuis.....	131
6.3.2 Comparaison entre bon et mauvais relais d'appuis.....	136
6.4 Discussion	141
6.4.1 Comparaison du service avec et sans relais d'appuis.....	142
6.4.2 Le mauvais relais d'appuis	148
6.4.3 Limites.....	151
6.4.4 Applications pratiques pour les entraîneurs.....	152
6.5 Conclusion.....	153
7 Étude 3 : Analyse biomécanique du service en plateau sur les contraintes articulaires du membre supérieur chez les jeunes joueurs élites.....	155
7.1 Introduction	155
7.2 Méthodologie générale.....	156
7.2.1 Participants de l'étude	157
7.2.2 Le service en plateau	157
7.2.3 Recueil des données sur les blessures	158
7.2.4 Analyses statistiques	159
7.3 Résultats	159
7.3.1 Contraintes articulaires maximales du membre supérieur.....	159
7.3.2 Blessures.....	160
7.3.3 Variables cinématiques.....	161
7.4 Discussion	163
7.4.1 Contraintes articulaires maximales et risques de blessures	164
7.4.2 Variables cinématiques.....	165
7.4.3 Limites.....	167
7.4.4 Recommandations pratiques aux entraîneurs et aux joueurs.....	168
7.5 Conclusion.....	169

8 Conclusion générale.....	171
9 Valorisations scientifiques	175
9.1 Publications	175
9.2 Communications	175
Bibliographie.....	176
Liste des figures	193
Liste des tableaux.....	199
Annexes	203
Annexe 1. Exemple d'un compte-rendu sur l'analyse biomécanique du service.....	203
Annexe 2. Caractéristiques détaillées des joueurs de l'étude 1.....	212
Annexe 3. Caractéristiques détaillées des joueuses de l'étude 1.....	213
Annexe 4. Méthodologie de l'EMG	214
1) Placement et orientation des électrodes	214
2) Traitement des signaux	216
Annexe 5. Résultats préliminaires pour l'EMG	217
Annexe 6. Résultats préliminaires pour la 2 nd e balle de service.....	219
1) Analyse cinématique.....	219
2) Analyse dynamique	221

Chapitre 1

Introduction

Le sport est complètement ancré dans notre société actuelle. Il représente un véritable terrain d'épanouissement physique, psychologique et social qui amène plus de 25 millions de Français à pratiquer une activité physique au moins une fois par semaine. S'agissant des enfants, les premières expériences sportives sont bien souvent initiées par les parents. Ces derniers les orientent en premier lieu vers une activité qu'ils pratiquent eux-mêmes ou pour laquelle ils ont une bonne représentation. Aussi, ils prennent en compte des aspects pratiques comme l'accès aux installations en fonction du lieu de résidence, la qualité des installations ou encore le coût financier de l'activité (INSERM, 2008). Le tennis, d'abord réservé à une certaine élite lorsqu'il est apparu en France à la fin du 19^{ème} siècle, s'est largement démocratisé dans la deuxième moitié du 20^{ème} siècle. La multiplication du nombre de courts sur le territoire et la baisse progressive des tarifs ont contribué à rendre l'activité beaucoup plus accessible qu'auparavant. Le tournoi de Roland-Garros reflète parfaitement l'engouement autour du tennis puisqu'il est l'évènement sportif qui intéresse le plus les Français derrière la coupe du monde de football et les Jeux Olympiques (TNS Sofres, 2008). Ce tournoi participe à véhiculer l'image d'un sport complet, agréable, intelligent, esthétique et non violent auprès du public (Chombart et Thomas, 1990). Nul doute que de nombreux enfants se sont aussi découverts une passion pour le tennis en regardant un match de Roland-Garros à la télévision. D'ailleurs, la grande popularité du tennis chez les jeunes se retrouve dans les chiffres : en 2018, la Fédération Française de Tennis (FFT) comptait plus de 500 000 licenciés de moins de 18 ans, représentant ainsi le 2^{ème} sport le plus pratiqué par les garçons et le 3^{ème} sport le plus pratiqué par les filles (INJEP, 2018).

En parallèle de la pratique sportive de masse, la pratique compétitive des enfants et des adolescents s'est fortement « professionnalisée » au cours des dernières années (DiFiori et al., 2014), et le tennis n'échappe pas à cette règle. Les enfants peuvent maintenant intégrer les écoles de tennis dès l'âge de 3 ans, puis débiter la compétition à partir de 7 ans. Sous l'impulsion des entraîneurs et des parents, les charges d'entraînement et le volume de compétitions s'intensifient très vite dans une logique d'excellence et de succès précoce. Cette nouvelle conception de la performance des jeunes joueurs se reflète parfaitement dans l'intérêt que les tournois internationaux juniors suscitent depuis quelques années maintenant. À titre d'illustration, plus de 350 joueurs et joueuses français de moins de 16 ans sont aujourd'hui engagés sur le circuit international (www.tenniseurope.org). Pour eux, l'équation est simple : l'ambition d'une carrière professionnelle implique de faire partie le plus tôt possible des meilleurs de sa catégorie d'âge.

Malheureusement, cette course aux résultats s'opère bien souvent au détriment de la santé des joueurs. D'ailleurs, ce projet de recherche trouve son origine dans un constat de la FFT qui a observé une recrudescence du nombre de blessures chez les jeunes joueurs et joueuses impliqués dans les programmes d'entraînement nationaux au cours de ces dernières années. Ces blessures constituent un véritable problème dans le sens où elles interrompent l'apprentissage, freinent la progression, nuisent aux résultats et parfois condamnent la suite de la formation sportive. En plus des rythmes d'entraînement et de compétition toujours plus soutenus, l'augmentation du nombre de blessures des joueurs élites peut également s'expliquer par la

transformation que le tennis a connu depuis une vingtaine d'années. En effet, l'évolution du matériel et l'amélioration des connaissances en préparation physique ont conduit à un sport très exigeant basé sur des actions explosives et des frappes de balles toujours plus rapides (Miller, 2006; Sánchez-Muñoz et al., 2007). Chez les joueurs professionnels, la vitesse du service a par exemple augmenté de $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ depuis les années 1990 (Cross et Pollard, 2009). Aujourd'hui, le service est un coup extrêmement violent souvent mis en cause dans l'apparition des blessures au niveau du tronc et des articulations du membre supérieur. Parallèlement, le service est devenu le coup le plus important pour les joueurs de haut niveau. Si la performance des joueurs s'exprime au travers de qualités techniques, tactiques, physiques et mentales exceptionnelles, la capacité à dominer l'adversaire avec son service, et plus particulièrement avec sa 1^{ère} balle de service, revient très régulièrement pour expliquer les raisons d'une victoire ou d'une défaite. L'Américaine Serena Williams, probablement la meilleure joueuse de l'Histoire du tennis, expliquait après sa défaite en finale de l'US Open 2019 : « *C'est le pire match que j'ai joué du tournoi. Je n'ai quasiment pas perdu mon service durant tout le tournoi et là, je n'ai pas passé de premières balles* » (Ramella, 2019).

Cette évolution du jeu a conduit à une augmentation de l'intérêt de la recherche scientifique pour le service, et en particulier pour le 1^{er} service. Puisque la technique gestuelle détermine en grande partie l'efficacité d'une frappe au tennis, de nombreuses études biomécaniques ont été menées dans le but d'analyser et de comprendre dans quelle mesure la technique du service pouvait influencer la performance et le risque d'apparition de pathologies chroniques. D'ailleurs, afin d'éviter toute confusion, il est important de souligner que le terme « service » est très souvent utilisé dans la littérature pour désigner le 1^{er} service. Dans ce travail, nous avons fait le choix de nous focaliser sur le 1^{er} service et nous suivrons la même logique dans notre rédaction, à savoir que sauf mention contraire, le mot service désignera le 1^{er} service.

Contrairement aux adultes, très peu d'études biomécaniques se sont intéressées au service des jeunes joueurs. Pourtant, l'apprentissage technique constitue un élément central de la formation de ces derniers. Actuellement, l'enseignement et l'optimisation du geste du service restent majoritairement guidés par les convictions des entraîneurs et par l'observation du modèle technique que représentent les joueurs professionnels.

Par conséquent, ce travail ambitionne d'apporter un éclairage sur l'évolution de la biomécanique du service chez les joueurs et les joueuses entre 12 ans et l'âge adulte. En outre, l'objectif est d'identifier les facteurs biomécaniques impliqués dans la performance et / ou la survenue des blessures chroniques lors de la réalisation du service. Finalement, ce travail vise à fournir des recommandations concrètes et spécifiques aux entraîneurs de tennis, aussi bien pour améliorer la formation technique des jeunes joueurs que pour aider à la détection des meilleurs espoirs.

Dans le chapitre 2, la revue de littérature permettra de mettre en évidence l'importance du service, et notamment de la vitesse de balle, dans la performance des joueurs et des joueuses élites. Puis, nous détaillerons le rôle que peut jouer la biomécanique dans l'analyse de la technique gestuelle au service ainsi que dans l'optimisation de la vitesse de balle. Nous décrirons aussi l'intérêt de la biomécanique dans le cadre de la prévention des blessures chroniques associées à la réalisation du service. Pour ce dernier point, nous présenterons les données épidémiologiques liées à la pratique du tennis, les blessures les plus courantes des jeunes joueurs et les facteurs de risque spécifiques pour ce jeune public. Ensuite, le chapitre 3 synthétisera les objectifs de ce travail de thèse. Puis, nous exposerons dans le chapitre 4 la méthodologie mise en œuvre au cours de ce travail. Les chapitres 5, 6 et 7 feront référence aux études 1, 2 et 3 menées pour répondre à notre problématique scientifique. L'étude 1 s'intéressera

à l'influence de l'âge et du sexe sur la vitesse de balle, sur les variables cinématiques ainsi que sur les niveaux de contraintes subies par les articulations du membre supérieur lors de la réalisation du service. L'étude 2 s'attachera à déterminer l'influence biomécanique de la technique d'appuis utilisée au service par les jeunes joueurs et ses effets sur la performance et le risque de blessures. L'étude 3 portera sur une erreur technique fréquemment rencontrée chez les jeunes joueurs de tennis, appelée « le service en plateau », et aura pour objectif d'identifier les conséquences de cette erreur sur la performance et le risque de blessures. Enfin, nous ferons la synthèse de nos résultats et plus globalement le bilan de notre travail dans le chapitre 8. Nous en profiterons pour mettre en lumière les applications pratiques qui émergent de ce travail et nous aborderons les perspectives à envisager lors de futures recherches.

Chapitre 2

Revue de littérature

2.1 L'importance du service chez les joueurs et joueuses de tennis élités

D'une manière générale, le service est considéré comme un coup très important du jeu puisque tous les points d'un match de tennis débutent par celui-ci (Bahamonde, 2000; Elliott et al., 1995). Le service est aussi le seul coup du tennis décrit comme une habileté fermée, permettant au joueur de contrôler tous les éléments de son exécution (Bahamonde, 2000; Roetert et al., 2009). Paradoxalement, il est également envisagé comme le coup le plus difficile à maîtriser (Chow et al., 2003; Girard et al., 2005). Cette difficulté est d'abord à mettre en relation avec les règles du jeu : obstacle vertical à franchir (le filet), zone horizontale et restreinte à atteindre (le carré de service), éloignement pour le joueur de la cible (position derrière la ligne de fond de court). De plus, d'un point de vue technique, le service est une action motrice complexe qui implique une coordination fine entre le bras qui lance la balle, le bras qui frappe la balle avec la raquette et les actions du tronc et des membres inférieurs (Bahamonde, 2000). Chez les joueurs débutants ou chez les jeunes joueurs en cours de formation, le service est souvent identifié comme un coup faible. L'objectif pour ces joueurs se résume souvent à mettre la balle en jeu et à minimiser le nombre de doubles fautes. En revanche, pour les joueurs et les joueuses professionnels, il devient un atout incontournable pour gagner le point et constitue probablement le coup le plus important du jeu à haut niveau (Hizan et al., 2011; Johnson et al., 2006; O'Donoghue et Brown, 2008).

2.1.1 Un coup fondamental dans la performance des joueurs et des joueuses adultes

2.1.1.1 Analyse stratégique chez le joueur de haut niveau : prendre l'avantage dès le début du point grâce au service

Le tennis de haut niveau se caractérise par de nombreuses séquences de jeu courtes ou très courtes. En effet, les joueurs et les joueuses professionnels frappent en moyenne entre deux et trois coups par point (Fernandez-Fernandez et al., 2008; Mendez-Villanueva et al., 2007). D'après Mendez-Villanueva et al. (2007), 58 % des points, chez les hommes, se terminent après seulement une ou deux frappes par joueur. Le duel qui s'instaure en début de point entre le serveur et le relanceur prend alors une importance considérable dans la logique du jeu (Ma et al., 2013; O'Donoghue et Brown, 2008). Sur le 1^{er} service, les joueurs et les joueuses adoptent une stratégie très offensive dans le but de prendre un ascendant direct sur l'adversaire ou de gagner le point immédiatement (ace ou service gagnant) (Antoun, 2007; Cahill, 2002; Gillet et al., 2009; Hizan et al., 2015; Pollard et Pollard, 2007). Ils engagent des services rapides vers des zones proches des lignes et éloignées de l'adversaire (Figure 2.1) (Hizan et al., 2015; Kovalchik et Reid, 2017). Le service « à plat » est le plus souvent utilisé et permet d'obtenir

une vitesse de balle élevée (Chow et al., 2003; Gillet et al., 2009; Sheets et al., 2011). Cependant, ce type de service implique également une trajectoire de balle tendue, ce qui réduit considérablement la marge de sécurité pour que la balle franchisse le filet et atterrisse dans les limites du carré de service (Sheets et al., 2011). Toutes les études rapportaient une moyenne de 60 % de réussite sur les 1^{ères} balles lors des matchs des joueurs et des joueuses professionnels (Barnett et al., 2008; Hizan et al., 2015; Kovalchik et Reid, 2017; Vaverka et al., 2018). En cas d'échec, ils engagent un 2nd service et font alors face à une double problématique. D'un côté, l'objectif principal est de frapper un service suffisamment efficace pour garder le contrôle du point et se protéger d'un retour agressif de l'adversaire. D'un autre côté, afin de ne pas perdre le point (double faute), ce service doit être plus sûr et un pourcentage de réussite supérieur à 85 % semble essentiel (Pollard et Pollard, 2007). Ainsi, des zones moins risquées et plus proches du centre du carré de service adverse sont recherchées, notamment chez les joueuses (Figure 2.1) (Antoun, 2007; Hizan et al., 2015). Le service est également moins rapide mais avec une quantité d'effet importante (Vaverka et al., 2018; Vaverka et Cernosek, 2013). L'effet imprimé à la balle permet d'obtenir une trajectoire plus sûre par rapport au filet ainsi qu'un rebond moins prévisible et beaucoup plus contraignant pour l'adversaire (Sheets et al., 2011; Vaverka et Cernosek, 2013). Chez les hommes, les 2^{ndes} balles sont quasi exclusivement des services liftés (Gillet et al., 2009; Sheets et al., 2011), orientés environ une fois sur deux sur le revers de l'adversaire (Figure 2.1). Antoun (2007) estime que peu de joueuses possèdent la puissance nécessaire pour produire ce type de service. Ainsi, la majorité des joueuses utilise le service slicé en 2^{nde} balle, orienté le plus souvent au centre du carré de service ou en direction du coup droit de l'adversaire (Figure 2.1). L'ensemble de ces éléments décrit une stratégie générale du service à haut niveau. Cette description ne doit pas faire oublier que les joueurs et les joueuses ajustent leurs intentions en fonction des différents choix tactiques qu'ils sont amenés à effectuer au cours d'un même match. Par exemple, ils prennent en considération les points forts et les points faibles de l'adversaire, le score, la surface de jeu, leur pourcentage de réussite au service et plus globalement leur capacité à gagner les points pour fournir la réponse la plus efficace possible (Barnett et al., 2008; Brody, 2003; Hizan et al., 2015; Vaverka et al., 2018).

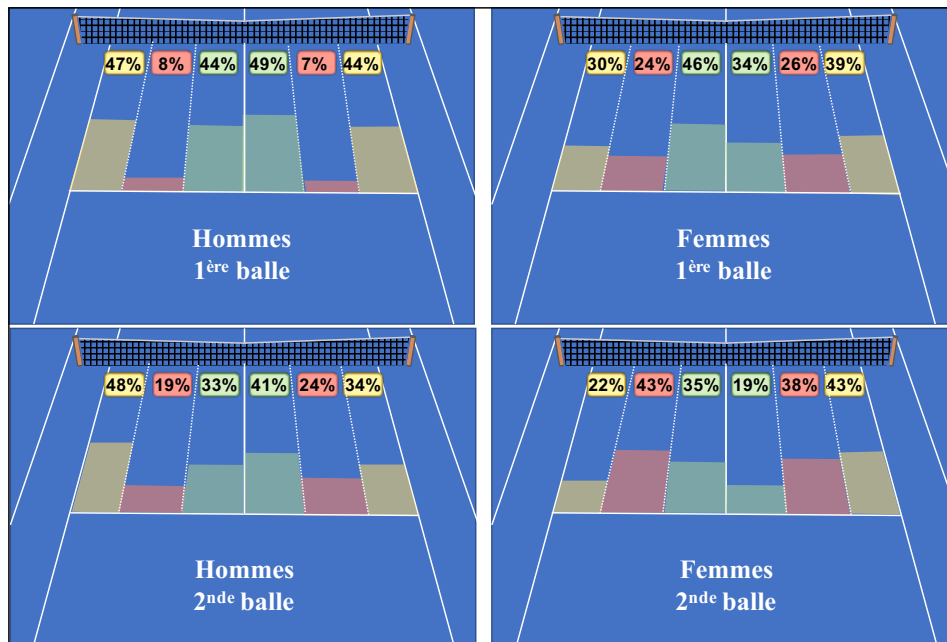


Figure 2.1 – Représentation schématique des zones atteintes au service par les joueurs et les joueuses lors de l’Open d’Australie 2008, d’après Hizan et al. (2015).

2.1.1.2 Analyse statistique chez le joueur de haut niveau : la qualité du service influence le gain du match

Les nombreuses données statistiques recueillies lors des matchs professionnels mettent en évidence l’avantage que le service procure dans le jeu à haut niveau. Cet avantage se matérialise dès la première frappe de balle puisque le nombre de points remportés grâce à un ace ou à un service gagnant est supérieur au nombre de points perdus à cause d’une double faute ou d’un retour gagnant adverse (Figure 2.2) (Brown et O’Donoghue, 2008). Cependant, il serait trop simpliste voire inexact de ne considérer que cette séquence pour résumer l’importance du service dans le jeu. En effet, le service peut également s’envisager comme le premier coup d’un enchaînement de plusieurs frappes, permettant au joueur ou à la joueuse d’obtenir une balle d’attaque, de monter au filet (enchaînement service – volée) ou encore de s’ouvrir le terrain avec un service extérieur. Chez les hommes, O’Donoghue et Brown (2008) ont démontré statistiquement cet avantage en soulignant que le joueur au service gagne 62 % des points lorsqu’il frappe une 1^{ère} balle et un deuxième coup de raquette. À partir du moment où il est amené à exécuter un troisième coup de raquette, cet avantage disparaît puisque les deux joueurs gagnent alors le même nombre de points. En appliquant le même raisonnement pour des matchs féminins, les auteurs de cette étude ont déterminé que la joueuse au service ne possède en revanche aucun avantage si le 1^{er} service est remis en jeu par l’adversaire. De façon plus générale, les joueurs professionnels gagnent entre 67 et 76 % des points derrière leur 1^{er} service et entre 38 et 57 % des points derrière leur 2nd service (Barnett et al., 2008; Brown et O’Donoghue, 2008; Carboch, 2017; Filipcic et al., 2015; Hizan et al., 2011; Kovalchik et Reid, 2017). Les joueuses quant à elles remportent entre 60 et 67 % des points après la 1^{ère} balle et entre 38 et 47 % des points après la 2^{ème} balle (Brown et O’Donoghue, 2008; Carboch, 2017; Hizan et al., 2011; Kovalchik et Reid, 2017). L’ensemble de ces données permet d’établir que le service fournit un avantage incontestable pour gagner le point, notamment dans le tennis masculin. L’étude de Carboch (2017) résume parfaitement ces deux éléments : sur les quatre tournois du Grand Chelem en 2016, les joueurs remportent en moyenne quatre jeux de service

sur cinq et les joueuses deux jeux de service sur trois. Pour aller encore plus loin, l'efficacité du service a été mise en lien avec l'issue du match et même, à plus grande échelle, avec le succès du joueur ou de la joueuse au cours de sa carrière (Antoun, 2007; Cross et Pollard, 2009; Filipcic et al., 2015; Ma et al., 2013). Tout d'abord, Ma et al. (2013) ont montré parmi une multitude d'indicateurs statistiques que le nombre d'aces, le pourcentage de réussite de la 1^{ère} balle et surtout le pourcentage de points gagnés après la 1^{ère} balle, sont les éléments qui expliquent le mieux une victoire ou une défaite sur le circuit professionnel. De plus, Filipcic et al. (2015) ont constaté que les joueurs professionnels qui ont un ratio victoires – défaites positif sur une année (joueurs mieux classés) possèdent un service plus efficace, frappent plus d'aces et commettent moins de doubles fautes que les joueurs qui ont un ratio victoires – défaites négatif (joueurs moins bien classés). Enfin, en prenant l'exemple de l'année 2006, les joueuses qui s'imposent dans les tournois du Grand Chelem sont excellentes au service, avec des indicateurs de performance bien supérieurs à ceux observés plus généralement sur le circuit professionnel féminin (Antoun, 2007).

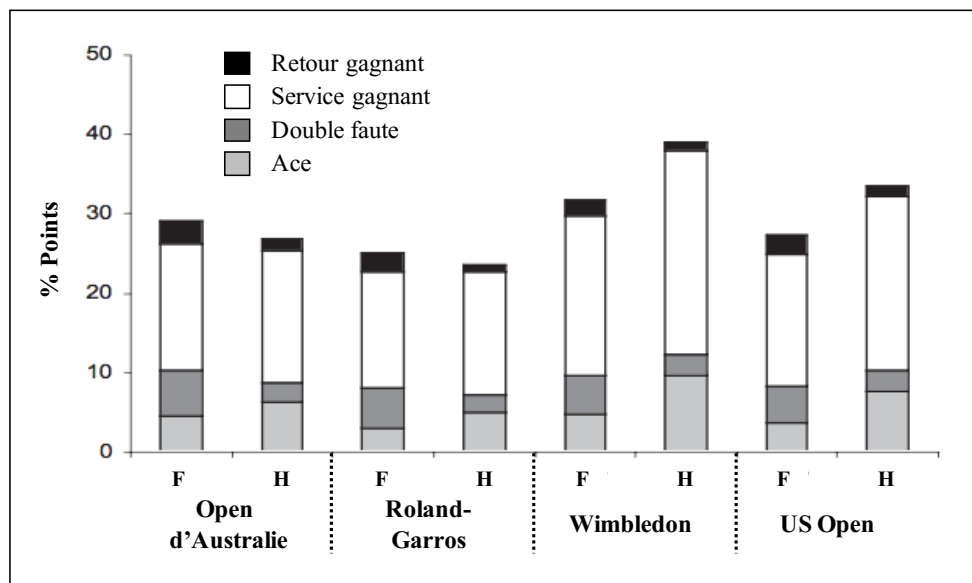


Figure 2.2 – Lors des tournois du Grand Chelem en 2007, proportion des points terminés après une frappe de balle maximum par joueur, montrant un net avantage pour le serveur (ace ou service gagnant) par rapport au relanceur (double faute ou retour gagnant), d'après Brown et O'Donoghue (2008). F : femmes, H : hommes.

2.1.2 Un coup en construction chez les jeunes joueurs élités

Trois études ont comparé plusieurs indicateurs de performance entre le service de jeunes joueurs et joueuses élités (moins de 12 ans [U12], moins de 16 ans [U16] et moins de 18 ans [U18]) et celui de joueurs et de joueuses professionnels (Hizan et al., 2011, 2015; Kovalchik et Reid, 2017). Le pourcentage de réussite sur la 1^{ère} balle approche 60 % dans tous les groupes considérés, reflétant ainsi un critère de performance davantage lié au niveau d'expertise qu'à l'âge des joueurs et des joueuses (Figure 2.3) (Hizan et al., 2011; Kovalchik et Reid, 2017). L'analyse de la distribution spatiale du service laisse pourtant apparaître une utilisation très différente de ce coup au travers des différentes catégories d'âge. Hizan et al. (2015) ont constaté que plus les joueurs étaient jeunes et plus ils dirigent leurs engagements vers le centre du carré

de service. Sur le 1^{er} service, cette zone est atteinte en moyenne entre 40 et 48 % sur les 1^{ères} balles et entre 48 et 66 % sur les 2^{ndes} balles chez les U12, et entre 18 et 37 % sur les 1^{ères} balles et entre 43 et 57 % sur les 2^{ndes} balles chez les U16 (Hizan et al., 2015). Ces résultats suggèrent la mise en place de stratégies moins offensives chez les jeunes joueurs, probablement dans le but de favoriser la réussite des engagements. De façon logique, le pourcentage de points gagnés derrière le 1^{er} et le 2nd service ainsi que le nombre d’aces par match sont plus faibles pour les U12, ces indicateurs augmentant ensuite progressivement avec l’âge (Figure 2.3). Paradoxalement, les jeunes joueurs commettent plus de doubles fautes par match que les joueurs adultes (Figure 2.3) (Hizan et al., 2011; Kovalchik et Reid, 2017). **La maîtrise d’un service offensif et efficace s’acquiert progressivement au fil des années de formation, et plusieurs hypothèses peuvent expliquer les moins bonnes performances des jeunes joueurs : des lacunes techniques dans la réalisation du geste, une difficulté à se concentrer durant la totalité du match, un déficit de taille qui ne facilite pas la réussite du service ou encore une vitesse de balle insuffisante pour perturber le retour de l’adversaire (Hizan et al., 2011, 2015; Kovalchik et Reid, 2017; Vaverka et Cernosek, 2013).**

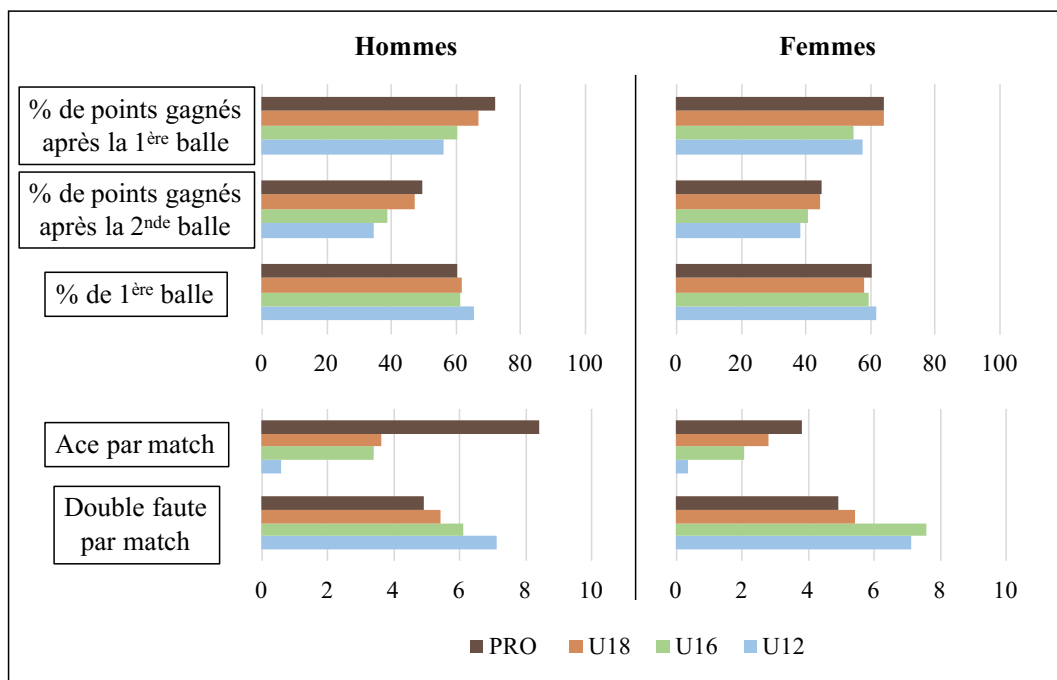


Figure 2.3 – Critères de performance au service pour les joueurs et les joueuses élites en fonction de l’âge, d’après Kovalchik et Reid (2017) et Hizan et al. (2011). U12 : moins de 12 ans, U16 : moins de 16 ans, U18 : moins de 18 ans, PRO : Professionnels adultes.

2.1.3 La vitesse de balle

2.1.3.1 Un élément clé de la performance au service

Plusieurs critères déterminent la performance au service : la vitesse de balle, la précision de la zone atteinte (Whiteside et Reid, 2017), le pourcentage de réussite (Brody, 2003), l’effet imprimé à la balle (Sakurai et al., 2013) ou encore la faculté à varier les zones pour surprendre le relanceur (Cahill, 2002). Parmi ces critères, la vitesse de balle est probablement celui qui a

été le plus analysé dans la littérature (Blackwell et Knudson, 2002; Chow et al., 2003; Elliott et al., 1995, 2003; Fleisig et al., 2003; Girard et al., 2007; Gordon et Dapena, 2006; Martin, Kulpa, Delamarche et Bideau, 2013; Sprigings et al., 1994). La comparaison de joueurs adultes de différents niveaux a mis en évidence qu'elle est un très bon indicateur de l'expertise des joueurs (Girard et al., 2005; Martin et al., 2014). Dans l'étude de Girard et al. (2005), les vitesses mesurées au service étaient respectivement de 107 km·h⁻¹, 149 km·h⁻¹ et 169 km·h⁻¹ pour des joueurs adultes débutants, intermédiaires et élites. Sur le circuit professionnel, la 1^{ère} balle de service dépasse régulièrement 200 km·h⁻¹ chez les hommes et 170 km·h⁻¹ chez les femmes (Tableau 2.1) (Kovalchik et Reid, 2017; Vaverka et al., 2018; Vaverka et Cernosek, 2013). Dans ces conditions, le service permet d'exercer une pression temporelle très forte sur le relanceur. Chez les hommes, le temps disponible pour le joueur au retour à partir de l'impact du 1^{er} service est généralement compris entre 0,7 et 0,9 seconde (Takahashi et al., 2006). Naturellement, plus la vitesse du service augmente et plus le temps disponible pour le relanceur diminue, impliquant une réduction de la qualité des retours (Haake et al., 2000) et une augmentation de la probabilité de gagner le point pour le serveur (O'Donoghue et Ballantyne, 2004). Une analyse récente portant sur 4 éditions consécutives de l'Open d'Australie masculin a montré que la vitesse moyenne des aces était de 194 km·h⁻¹ alors que les services remis en jeu par le relanceur étaient en moyenne 10 km·h⁻¹ moins rapides (Whiteside et Reid, 2017). Cross et Pollard (2009) ont souligné de leur côté que les gagnants des matchs dans les tournois du Grand Chelem servent en moyenne 2 à 4 km·h⁻¹ plus vite que leurs adversaires. Tous ces éléments permettent d'envisager la vitesse du service comme un élément fondamental dans le niveau de performance des joueurs et des joueuses professionnels.

	Open d'Australie	Roland- Garros	Wimbledon	US Open
Hommes				
Vitesse de balle maximale (km·h ⁻¹)	205,5 ± 10,7	201,2 ± 9,3	205,5 ± 10,1	206,5 ± 10,4
Vitesse moyenne en 1 ^{ère} balle (km·h ⁻¹)	184,7 ± 9,2	180,3 ± 9,6	185,7 ± 8,8	183,3 ± 10,3
Vitesse moyenne en 2 ^{nde} balle (km·h ⁻¹)	151,5 ± 11,4	146,6 ± 10,3	155,6 ± 10,1	148,1 ± 11,7
Femmes				
Vitesse de balle maximale (km·h ⁻¹)	173,6 ± 11,2	171,3 ± 9,9	174,5 ± 7,8	174,3 ± 9,6
Vitesse moyenne en 1 ^{ère} balle (km·h ⁻¹)	157,9 ± 10,9	155,2 ± 9,1	159,2 ± 7,3	156,5 ± 9,7
Vitesse moyenne en 2 ^{nde} balle (km·h ⁻¹)	131,6 ± 9,4	129,9 ± 7,8	135,9 ± 8,5	130,5 ± 8,3

Tableau 2.1 – Vitesses maximales et vitesses moyennes de la 1^{ère} balle et de la 2^{nde} balle (moyenne ± écart-type) mesurées lors des tournois du Grand Chelem en 2016, d'après Vaverka et al. (2018).

Concernant les jeunes joueurs, Ulbricht et al. (2016) ont mesuré les caractéristiques anthropométriques et la vitesse du service chez plus de 900 joueurs et joueuses (U12, U14 et U16 ; niveau régional et national). Ils ont également évalué plusieurs qualités physiques (vitesse de course, endurance de course, puissance des membres inférieurs et des membres supérieurs, force de préhension de la main). Les auteurs de cette étude ont d'abord montré que la vitesse du service était significativement supérieure pour tous les groupes de niveau national par rapport à ceux de niveau régional (Figure 2.4). Parmi toutes les variables mesurées, ils ont également identifié la vitesse de balle comme le critère le mieux corrélé avec le classement des

joueurs et des joueuses dans chaque catégorie d'âge. Les résultats de ces travaux mettent en avant deux éléments essentiels dans la logique de ce travail de thèse. D'une part, ils soulignent **l'importance du service dans la performance des jeunes joueurs et des jeunes joueuses élites et ce, dès l'âge de 11 – 12 ans**. D'autre part, ces résultats suggèrent que **l'optimisation du service doit occuper une place prépondérante dans l'entraînement dans une logique de formation vers le haut niveau**.

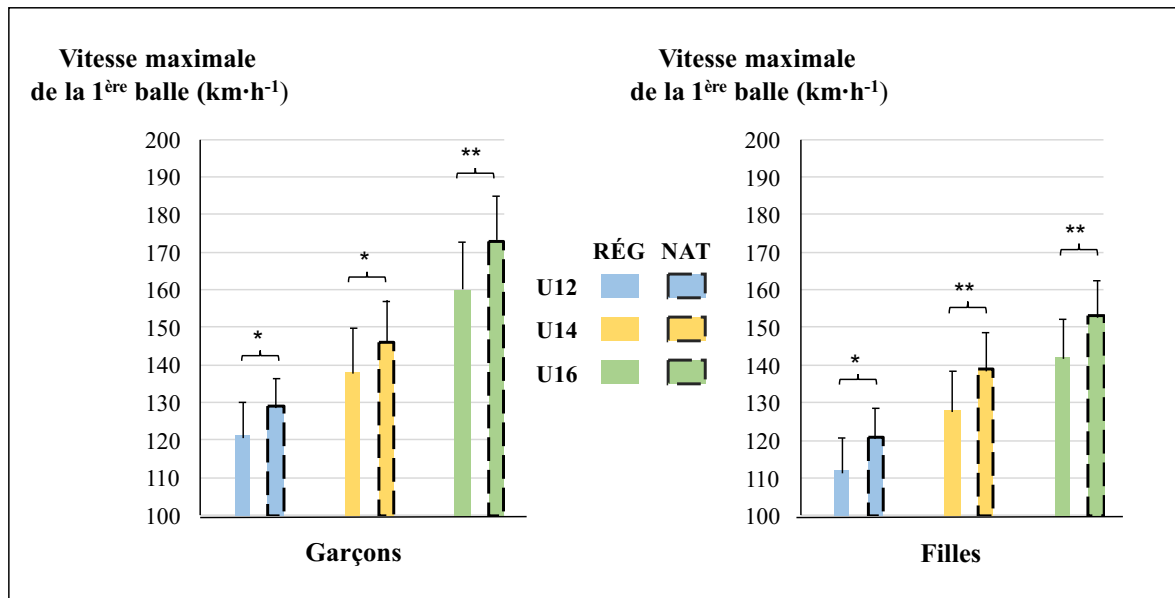


Figure 2.4 – Comparaison de la vitesse maximale de la 1^{ère} balle en fonction du niveau de jeu pour des garçons et des filles de trois catégories d'âge, d'après Ulbricht et al. (2016). U12 : moins de 12 ans, U14 : moins de 14 ans, U16 : moins de 16 ans, RÉG : niveau régional, NAT : niveau national. ** : $P < 0,001$, * : $P < 0,05$.

2.1.3.2 Facteurs influençant la vitesse de balle

La mesure de la vitesse du service, sur le terrain ou en laboratoire, constitue un outil précieux dans le cadre de l'optimisation de la performance. En comparant la vitesse du service d'un jeune joueur avec les données disponibles dans la littérature, un entraîneur peut définir le niveau d'expertise de ce joueur, estimer sa marge de progression puis définir des axes de travail pertinents. Toutefois, différents facteurs influencent la vitesse de balle au service (Elliott, 2006; Plum, 1999; Vaverka et al., 2018). La prise en compte de ces différents facteurs est essentielle afin de pouvoir évaluer un jeune joueur de façon précise et objective.

2.1.3.2.1 Les caractéristiques anthropométriques

De nombreux travaux ont permis de mettre en évidence une corrélation positive entre la vitesse du service et la taille des joueurs et des joueuses élites, aussi bien chez les jeunes que chez les adultes (Figure 2.5) (Bonato et al., 2015; Cross et Pollard, 2009; Hayes et al., 2018; Palmer et al., 2018; Sögüt, 2016; Vaverka et Cernosek, 2013). L'avantage d'un « bras de levier » plus important pour les grands joueurs est souvent avancé dans la littérature, mais cette hypothèse n'a pas été vérifiée (Bonato et al., 2015; Hayes et al., 2018;

Vaverka et Cernosek, 2013). L'analyse balistique du service permet d'envisager une explication plus concrète qui décrit un lien entre la taille, la vitesse de balle et la réussite du service. Pour une hauteur d'impact donnée, l'augmentation de la vitesse du service implique inévitablement une réduction de la marge de sécurité pour que la balle atterrisse dans les limites du carré de service (Brechbuhl et al., 2001; Brody, 2003). Parallèlement, pour une vitesse de balle donnée, plus la hauteur de l'impact est élevée et plus la marge de sécurité augmente (Brechbuhl et al., 2001). Un joueur de grande taille possède un avantage pour aller frapper la balle plus haut. De façon théorique, il peut ainsi accélérer son service tout en conservant une probabilité de réussite importante. À l'inverse, un joueur plus petit est sans doute contraint de limiter sa vitesse de balle pour ne pas compromettre trop fortement la réussite de son service (Bonato et al., 2015; Vaverka et Cernosek, 2013). Par ailleurs, la relation entre la masse des joueurs et la vitesse du service n'apparaît pas aussi clairement dans la littérature. Hayes et al. (2018) ont retrouvé une forte corrélation entre ces deux variables ($r = 0,68$ et $P < 0,05$) dans une population de 21 joueurs et joueuses élites, âgés de 13 à 21 ans. En revanche, cette relation n'a pas été établie lors de deux études n'impliquant que de petits échantillons de joueurs adultes (8 joueurs professionnels et 12 joueurs élites) (Bonato et al., 2015; Wong et al., 2014).

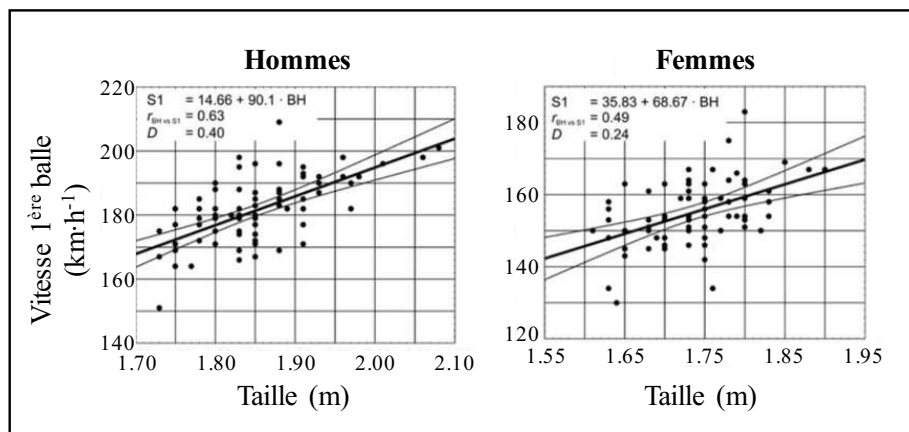


Figure 2.5 – Relation entre la vitesse de balle au service et la taille des joueurs et des joueuses lors de l'US Open 2008, d'après Vaverka et Cernosek (2013).

2.1.3.2.2 La force musculaire

Afin de mieux comprendre la performance au service et d'orienter plus efficacement les contenus d'entraînement, plusieurs études se sont intéressées à la relation entre la force musculaire et la vitesse de balle au service. Même si quelques contradictions subsistent dans la littérature, il est plutôt admis qu'une augmentation de la force musculaire a une incidence positive sur la vitesse du service (Fernandez-Fernandez et al., 2013; Pluim, 1999). Baiget et al. (2016) ont évalué les niveaux de force isométrique lors de différents mouvements articulaires chez 12 joueurs élites ($17,2 \pm 1,0$ ans). Ils ont montré une corrélation significative et large entre la vitesse de balle et la force isométrique en rotation interne de l'épaule à 90° d'abduction ($r = 0,67$ et $P < 0,05$). Cette association a également été retrouvée dans l'étude de Hayes et al. (2018) ($r = 0,56$ et $P < 0,05$). À l'inverse, aucune corrélation n'a été établie entre la vitesse de balle et les niveaux de force isométrique maximale pour l'extension du dos, pour la rotation externe de l'épaule et pour la flexion et l'extension de l'épaule, du coude et du poignet (Baiget et al., 2016). L'évaluation des niveaux de force sur des mouvements isolés

possède cependant certaines limites lorsqu'il s'agit d'expliquer la vitesse du service, notamment parce que le service est un mouvement complexe qui implique une action coordonnée de nombreux segments corporels (Baiget et al., 2016). En proposant un test mobilisant conjointement la force isométrique des membres inférieurs et des membres supérieurs (« isometric mid-thigh pull » test), Hayes et al. (2018) ont observé une corrélation très forte entre le niveau de force et la vitesse du service ($r = 0,87$ et $P < 0,01$). Ces auteurs ont identifié une autre corrélation très forte entre la vitesse du service et le niveau de force des membres inférieurs lors d'un test de détente verticale (« countermovement jump » (CMJ), $r = 0,77$ et $P < 0,01$). Cette dernière association n'a en revanche pas été retrouvée pour des joueurs professionnels adultes (Bonato et al., 2015).

2.1.3.2.3 Les catégories d'âge

La taille et la force musculaire sont deux facteurs qui jouent un rôle sur la vitesse de balle au service. Par conséquent, l'influence de l'âge sur la vitesse du service ne peut pas être abordée sans un regard sur les processus de maturation associés à la période de la puberté. La maturation désigne tous les changements physiques, physiologiques et psychologiques qui s'opèrent sur l'organisme entre l'enfance et l'âge adulte (DiFiori et al., 2014). Si ces changements interviennent d'une façon très différente entre les garçons et les filles, l'augmentation rapide de la taille (pic de croissance) et l'augmentation de la force musculaire sont deux changements majeurs observés pour les deux sexes entre 12 et 15 ans (Barber-Westin et al., 2006; DiFiori et al., 2014; Girard et Millet, 2009; Ulbricht et al., 2016). Ainsi, il paraît logique d'observer durant cette période une augmentation progressive de la vitesse de balle chez les garçons comme chez les filles (Fernandez-Fernandez et al., 2014; Ulbricht et al., 2016). Ulbricht et al. (2016) ont rapporté des vitesses maximales de l'ordre de $129 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (U12), $146 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (U14) et $173 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (U16) pour des garçons de niveau national et de $121 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (U12), $139 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (U14) et $153 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (U16) pour des filles de niveau national (Figure 2.4). À partir de 15 ans, les changements physiques sont beaucoup moins marqués chez les filles alors que la taille et la force peuvent augmenter jusqu'à 18 ans chez les garçons (DiFiori et al., 2014; Ellenbecker et al., 2007; Ulbricht et al., 2016). Cette différence dans le développement entre les deux sexes est un élément à prendre en compte lorsqu'il s'agit d'interpréter l'évolution de la vitesse de balle après 15 ans. Kovalchik et Reid (2017) ont comparé la vitesse moyenne de la 1^{ère} balle lors de matchs juniors (meilleurs U18 mondiaux) et de matchs séniors à l'Open d'Australie entre 2012 et 2017. Ils ont mis en évidence un déficit très net dans la vitesse du service pour les U18 garçons ($158 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) par rapport à leurs homologues professionnels ($179 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$). En revanche, la vitesse du service des U18 filles était relativement comparable à celle des joueuses professionnelles (respectivement $146 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ contre $153 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$). Ces résultats sous-entendent que la vitesse du service continue d'augmenter chez les garçons après l'âge de 18 ans, alors que les filles parviennent à atteindre de façon plus précoce une vitesse de service proche des références du haut niveau. Cette idée est confirmée par les travaux de Whiteside et al. (2013), les auteurs constatant que la vitesse maximale de la tête de raquette lors du service, qui est une variable en relation avec la vitesse de balle, est très similaire entre des joueuses élites U16 et des joueuses professionnelles (respectivement $148 \pm 11 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ et $155 \pm 11 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$).

L'utilisation de l'âge chronologique (catégories d'âge) possède néanmoins certaines limites lorsqu'il s'agit d'interpréter la performance des jeunes sportifs. Entre des enfants ou des adolescents ayant le même âge chronologique, il existe en effet une grande variabilité dans l'apparition et le rythme des processus de croissance et de maturation (DiFiori et al., 2014; Lloyd et al., 2014). Il est largement admis dans la littérature que ces différences ont un impact sur le niveau de performance sportive (Baxter-Jones et al., 2005; Malina et al., 2004). L'âge

biologique, qui définit le niveau de maturation d'un individu au cours de la puberté, est ainsi utilisé pour discriminer plus efficacement les performances des jeunes sportifs issus d'une même catégorie d'âge. Celui-ci peut être déterminé de manière précise grâce à l'évaluation de l'âge osseux ou de l'âge sexuel. Toutefois, ces deux méthodes possèdent aussi plusieurs inconvénients sur le plan méthodologique (questions d'ordre éthique, accessibilité ou coût financier). Une évaluation plus simple pour estimer la maturation biologique d'un enfant consiste à déterminer l'âge au pic de croissance grâce à la mesure de différentes variables anthropométriques (Baxter-Jones et al., 2005; Lloyd et al., 2014).

2.1.3.2.4 Le sexe

La comparaison entre les performances masculines et les performances féminines a toujours fait l'objet de nombreux débats dans le monde du sport. Dans plusieurs disciplines en athlétisme ou en natation, il est rapporté que les performances sont relativement semblables entre les garçons et les filles avant la puberté (Handelsman, 2017). Les différences entre les deux sexes commencent généralement à apparaître autour de 12 – 13 ans puis elles s'intensifient progressivement avec l'âge. Chez les adultes, il est largement reconnu que les performances des hommes surpassent celles des femmes dans les actions sportives qui nécessitent des qualités de vitesse ou de force (Handelsman, 2017; Lombardo et Deaner, 2018). Au tennis, l'analyse des données de la littérature montre que la vitesse du service est systématiquement supérieure pour les joueurs par rapport aux joueuses de même âge et de même niveau (Fernandez-Fernandez et al., 2014; Kovalchik et Reid, 2017; Ulbricht et al., 2016; Vaverka et al., 2018; Vaverka et Cernosek, 2013). Toutefois, les écarts de vitesse sont minimes dans la catégorie U12 et n'excèdent pas $9 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (Fernandez-Fernandez et al., 2014; Ulbricht et al., 2016). Ces résultats sont à rapprocher des observations de Lombardo et Deaner (2018) qui mentionnent des performances dans les activités de lancer légèrement supérieures pour les garçons même avant l'âge de 12 ans. Pour les U14, les écarts de vitesses au service restent relativement faibles entre les deux sexes (entre 7 et $10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), avant de s'amplifier considérablement dans la catégorie U16 (entre 18 et $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) puis dans la catégorie U18 ($26 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) (Fernandez-Fernandez et al., 2014; Ulbricht et al., 2016). À l'instar des mouvements de lancer, les différences retrouvées dans la performance au service après 14 ans sont majoritairement attribuées aux déficits de taille et de force musculaire des filles par rapport aux garçons (Figure 2.6) (Handelsman, 2017; Lombardo et Deaner, 2018; Pluim, 1999; Vaverka et Cernosek, 2013). À l'âge adulte, la vitesse du service des joueuses professionnelles est inférieure de 15 à 20 % à celle des joueurs professionnels (Tableau 2.1) (Chow et al., 2003; Elliott et al., 2003; Vaverka et al., 2018; Vaverka et Cernosek, 2013).

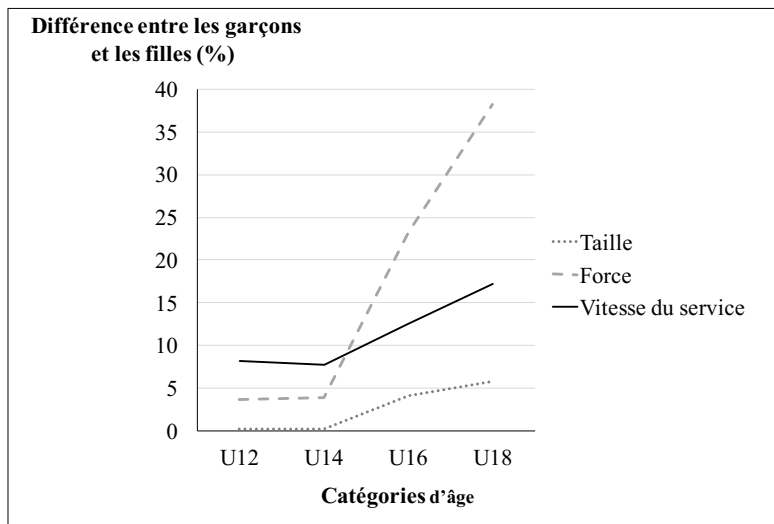


Figure 2.6 – Représentation des différences de taille, de force musculaire (test de lancer de médecine-ball) et de vitesse du service entre les joueurs et les joueuses en fonction des catégories d'âge, adaptée des travaux de Fernandez-Fernandez et al. (2014).

2.1.3.2.5 La technique gestuelle

La technique gestuelle désigne une séquence spécifique de mouvements utilisée pour résoudre une tâche dans une situation sportive (Schönborn, 2002). Elle est à la base de la performance de chaque coup du tennis (Elliott, 2006). Pour l'entraîneur, l'optimisation de la technique fait référence à l'exécution de mouvements plus simples (absence de mouvement parasite), plus économiques (dépense d'énergie minimum) ou plus efficaces (amélioration de la vitesse ou de la précision de la frappe). La recherche de cette « technique idéale » est en partie liée aux principes et aux lois biomécaniques qui régissent le mouvement sportif (Schönborn, 2002). De nombreuses études biomécaniques se sont intéressées au service des joueurs et des joueuses adultes de haut niveau, permettant ainsi d'identifier plusieurs éléments techniques en lien avec la vitesse de balle (Figure 2.7) (Elliott, 2006; Elliott et al., 1995, 2003; Fleisig et al., 2003; Girard et al., 2007; Sweeney et al., 2012). Ces éléments techniques sont présentés de manière plus approfondie dans la partie concernant l'analyse biomécanique et l'optimisation du geste du service (Partie 2.2). **En revanche, le service des jeunes joueurs et des jeunes joueuses élités a fait l'objet de beaucoup moins de considération dans la littérature** (Campbell et al., 2013; Reid et al., 2010; Whiteside et al., 2013). Whiteside et al. (2013) ont décrit l'évolution biomécanique du service féminin en s'intéressant à des joueuses U12 ($10,5 \pm 0,5$ ans), des joueuses U16 ($14,6 \pm 0,7$ ans) et des joueuses professionnelles ($21,3 \pm 3,8$ ans). Les résultats, qui sont aussi détaillés dans la suite de cette revue de littérature (Partie 2.2), ont mis en évidence plusieurs changements techniques majeurs pour expliquer l'augmentation de la performance du service avec l'âge : une amélioration de l'explosivité de la poussée des jambes, une augmentation de la vitesse maximale de rotation antéropostérieure du tronc, une amélioration de la projection du coude (angle d'extension du coude à l'impact et vitesse maximale d'extension du coude) et une augmentation des vitesses maximales de flexion du poignet et de rotation interne de l'épaule. **Ces résultats méritent d'être confirmés par d'autres travaux, d'autant que la performance des joueuses n'a pas été appréciée par la vitesse du service mais par la vitesse maximale de la raquette avant l'impact. Pour le service masculin, il est important de souligner qu'aucun résultat similaire n'a été rapporté dans la littérature.** De surcroît, s'il semble acquis que la vitesse

du service des joueuses est inférieure à celle des joueurs de même âge et de même niveau (Fernandez-Fernandez et al., 2014; Ulbricht et al., 2016), aucune étude ne permet d'attribuer ces écarts de vitesse à des différences sur le plan technique. Dans la pratique, les jeunes joueuses sont parfois la cible de commentaires négatifs leur prêtant un niveau technique plus faible que celui des garçons, et cet élément n'a évidemment aucun fondement scientifique. En résumé, de nombreuses incertitudes demeurent quant à l'évolution biomécanique du service des jeunes joueurs et des jeunes joueuses élites au cours de la formation. Il en résulte que l'enseignement du service se base essentiellement sur des connaissances empiriques et sur une transposition du modèle technique observé chez les joueurs et les joueuses professionnels. Ce fonctionnement possède une limite importante puisque les jeunes joueurs n'ont pas les mêmes caractéristiques anatomiques ou physiologiques que leurs homologues adultes, ce qui les rend potentiellement incapables de reproduire les mêmes actions motrices (Schönborn, 2002). Une meilleure connaissance de l'évolution technique du service chez les garçons et chez les filles permettrait aux entraîneurs d'adapter et d'individualiser plus efficacement les contenus d'entraînements. **L'étude 1 de ce travail de thèse fera l'objet d'une analyse biomécanique du service des jeunes joueurs et des jeunes joueuses élites en fonction des catégories d'âge (U14, U16, plus de 16 ans [+16]) et en fonction du sexe. En outre, il s'agira dans cette étude d'extraire les déterminants biomécaniques qui influencent la vitesse du service au sein de ces différents groupes.**

Par ailleurs, les jeunes joueurs et les jeunes joueuses sont des sportifs engagés dans un processus d'apprentissage et de formation technique. Cela signifie que leur technique gestuelle se construit puis évolue sous l'effet de l'entraînement et du développement physique (Whiteside et al., 2013) et par conséquent, que celle-ci n'est pas toujours efficace sur le plan biomécanique. Ce dernier point se vérifie encore plus pour le geste du service dans la mesure où il est très certainement le coup le plus complexe à réaliser au tennis (Bahamonde, 2000; Kovacs et Ellenbecker, 2011). Au cours de la formation, le rôle d'un entraîneur est d'optimiser la performance du joueur en apportant des apprentissages techniques pour augmenter la vitesse du service tout en corrigeant les éléments techniques qui, à l'inverse, seraient susceptibles de compromettre cette vitesse ou d'augmenter les risques de blessures. Si de très nombreuses idées sont véhiculées dans le monde de l'entraînement concernant d'éventuelles erreurs techniques au service, la littérature scientifique manque cruellement de données objectives à ce sujet. **Ce travail de thèse s'attachera, via les études 2 et 3, à déterminer les conséquences de deux erreurs techniques couramment observées au service par les entraîneurs sur la performance et les risques de blessures des jeunes joueurs élites.**

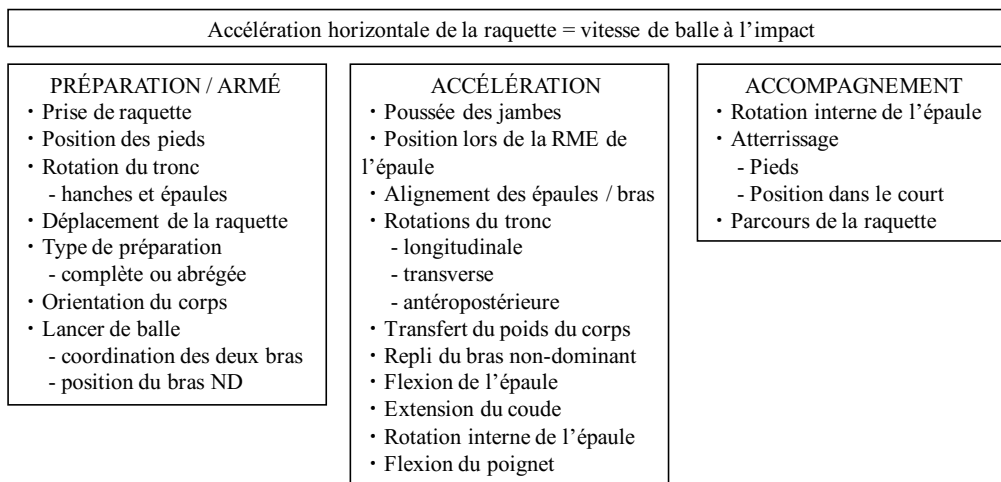


Figure 2.7 – Les principaux éléments techniques qui déterminent la performance du service des joueurs adultes, d'après Elliott (2006). ND : non-dominant, RME : rotation maximale externe.

2.2 L'analyse biomécanique du service pour optimiser la performance

2.2.1 Objectifs et intérêt de l'analyse biomécanique

La biomécanique, qui se définit comme l'analyse du mouvement humain, ambitionne de répondre à une double problématique lorsqu'elle est appliquée aux mouvements sportifs : augmenter les performances de l'athlète pour un geste donné tout en minimisant les risques de blessures qui lui sont associés (Bartlett et Bussey, 2009; Elliott, 2006; Knudson, 2007). Au tennis, si la performance reste éminemment multifactorielle, la réussite et l'efficacité de chaque frappe sont fortement dépendantes de la technique gestuelle (Elliott, 2006). Une technique efficace peut s'envisager d'un point de vue biomécanique comme la façon d'optimiser l'utilisation de l'énergie élastique des muscles (cycle étirement – raccourcissement) ou de coordonner efficacement l'action des différents segments corporels lors d'une frappe (transfert d'énergie) (Elliott, 2006; Knudson, 2007). L'étude des causes du mouvement (analyse dynamique), l'étude des conséquences du mouvement (analyse cinématique) ou l'étude de l'activité électrique des muscles (analyse électromyographique) sont utilisées en biomécanique pour identifier et comprendre les variables liées à la performance (van den Bogert, 1994).

Sur le terrain, l'entraîneur de tennis optimise la technique gestuelle de son joueur en utilisant le plus souvent une approche qualitative (ou subjective) fondée sur ses connaissances, sur son expérience personnelle et sur son « œil ». L'analyse biomécanique permet quant à elle d'apporter des données fiables et précises sur les variables associées à la performance dans une approche qualifiée de quantitative (ou objective). L'adéquation entre ces deux approches est complexe, notamment parce que les résultats issus des études biomécaniques ne sont pas toujours intuitifs ou pragmatiques pour les entraîneurs (Knudson, 2007). Pourtant, l'optimisation de la performance du sportif de haut niveau requiert une approche pluridisciplinaire de la part de l'entraîneur (Bartlett, 2007; Knudson, 2001). Des notions centrales de la performance sportive telles que l'équilibre, la coordination ou encore la production de force font référence à des principes biomécaniques généraux (Knudson, 2001,

2007). Une connaissance solide de ces principes et de leurs applications sur le terrain devient alors un atout incontournable pour faire progresser l'athlète.

Plus concrètement, l'analyse biomécanique permet d'évaluer de façon très précise la technique gestuelle du joueur (Knudson, 2001, 2007). Si les facteurs mécaniques jouant un rôle sur la performance ont été préalablement identifiés (Elliott, 2006), elle permet de déterminer les forces et les faiblesses techniques d'un athlète et fournit à l'entraîneur des pistes de travail concrètes en vue de l'optimisation de la performance. De plus, l'analyse biomécanique permet de comparer les avantages et les inconvénients de plusieurs organisations techniques observées pour un même geste sportif. Par exemple, le service « compact » est apparu il y a quelques années au tennis comme une simplification du service traditionnel (Seeley et al., 2008). Toutefois, certains entraîneurs estimaient que cette technique de service diminuait la performance ou augmentait les sollicitations de l'épaule lors du mouvement (Elliott, 2001; Seeley et al., 2008). Deux études biomécaniques ont alors démontré que la vitesse de balle, les contraintes articulaires à l'épaule et l'activité électrique des muscles de l'épaule sont identiques entre ces deux organisations techniques, fournissant ainsi des arguments scientifiques concrets pour encourager l'utilisation du service « compact » (Elliott et al., 2003; Seeley et al., 2008). D'ailleurs, dans la mesure où le service commence par une phase arrêtée et que sa réalisation est sous le contrôle total du joueur (Bahamonde, 2000; Roetert et al., 2009), il peut être étudié en laboratoire dans une situation presque identique à celle retrouvée lors d'un match, ce qui est une condition nécessaire à l'observation d'un mouvement réaliste et à la mesure de données pertinentes (Abrams et al., 2011; Krosshaug et al., 2005).

2.2.2 Analyse cinématique de la première balle de service

2.2.2.1 Description générale du service

Le service constitue une action spécifique pour chaque athlète (Tubez et al., 2015), résultat d'un apprentissage et d'une évolution depuis les premières années de formation jusqu'à la fin de la carrière (Whiteside et al., 2013). L'observation du service des joueurs et des joueuses élites fait ressortir des différences interindividuelles, aussi bien dans l'organisation des membres inférieurs (Martin, 2015; Renoult, 2007) que dans celle des membres supérieurs (Elliott et al., 2003; Seeley et al., 2008). Malgré tout, le service possède une structure mécanique fondamentale, et de nombreux éléments techniques sont communs à l'ensemble des joueurs et des joueuses (Elliott, 2006). Aussi bien chez les jeunes que chez les adultes, il s'articule autour d'évènements clés, permettant sa description selon différentes phases qui se succèdent chronologiquement : la phase de préparation, la phase d'armé, la phase d'accélération, la phase de décélération et la phase d'accompagnement (Figure 2.8) (Bahamonde, 2000; Kovacs et Ellenbecker, 2011; Reid et al., 2010; Whiteside et al., 2013).

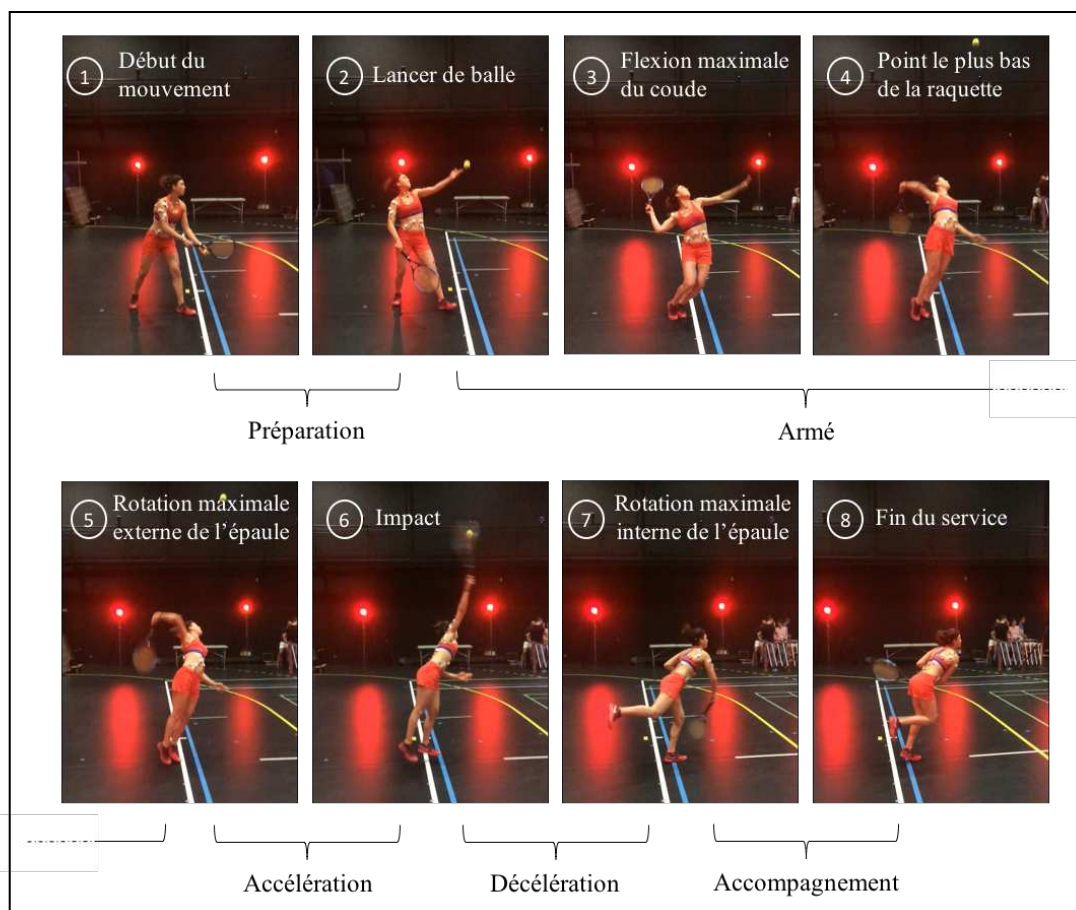


Figure 2.8 – Les différentes phases et événements clés du service.

La phase de préparation, entre le début du mouvement et le lancer de balle : elle reflète davantage le style du joueur plutôt qu'une réelle logique biomécanique (Kovacs et Ellenbecker, 2011). Le joueur se positionne de profil par rapport au filet, le pied gauche prenant place devant le pied droit (pour un droitier), avec un écartement de pieds qui doit être confortable. Les lignes des hanches et des épaules sont alignées en direction de la cible visée. Les deux bras sont relâchés en avant du joueur, avec la main dominante qui tient la raquette et la main non-dominante qui tient la balle. Ensuite, les bras se dissocient : le bras non-dominant s'élève lentement vers le haut et l'avant pour lancer la balle, alors que le bras qui tient la raquette se dirige vers l'arrière et vers le bas lors d'une préparation complète ou vers l'arrière et le haut lors d'une préparation plus compacte (Seeley et al., 2008).

La phase d'armé, entre le lancer de balle et la rotation maximale externe (RME) de l'épaule : cette phase d'armé est souvent subdivisée en 3 sous-phases. Tout d'abord, le début de la phase d'armé se déroule entre le lancer de balle et la flexion maximale du coude. Entre ces deux événements, le joueur effectue une extension de la tête pour suivre la balle des yeux. Il continue à amener la raquette derrière lui, tout en inclinant le tronc vers la droite (inclinaison latérale) et vers l'arrière (extension). C'est à ce moment-là que la mise en charge des membres inférieurs intervient, soit avec des appuis fixes au sol (sans relais d'appuis), soit en ramenant le pied arrière derrière le pied avant (relais d'appuis). Avant d'observer la flexion maximale du coude, une synchronisation s'opère entre les membres inférieurs, les membres supérieurs et le lancer de balle : la balle atteint son zénith, la raquette est en position haute (PLHR), les membres inférieurs sont en flexion maximale et l'épaule gauche, l'épaule droite et le coude droit sont

alignés (pour un joueur droitier) (Bonney et al., 2009; Whiteside et al., 2013). Ensuite, le milieu de la phase d'armé se déroule entre la flexion maximale du coude et le moment où la raquette atteint son point le plus bas dans le dos (PLBR). Le joueur commence à produire une extension puissante des membres inférieurs. Au niveau du haut du corps, une légère adduction horizontale du bras dominant permet d'amorcer la rotation externe de l'épaule, conduisant à la descente de la raquette derrière le dos. Le bras non-dominant commence à s'abaisser, facilitant par la suite la bascule de l'épaule droite par-dessus l'épaule gauche. Une nouvelle synchronisation entre le haut du corps et le bas du corps intervient entre le décollage du joueur et PLBR (Bonney et al., 2009). Enfin, l'intervalle entre PLBR et la RME de l'épaule correspond à la fin de la phase d'armé. L'extension puissante des membres inférieurs permet au joueur de s'élever et d'initier les mouvements du tronc. L'épaule dominante se retrouve en position de RME (autour de 172°), en légère adduction horizontale (autour de 7°) et en abduction (autour de 100°) tandis que la raquette commence son accélération vers le haut (Fleisig et al., 2003).

La phase d'accélération, entre la RME de l'épaule et l'impact : afin de produire une violente accélération de la raquette, les actions du membre supérieur dominant s'enchaînent dans un intervalle de temps très bref : l'extension du bras, la pronation de l'avant-bras, la flexion du poignet et la rotation interne de l'épaule. L'accélération du bras s'accompagne d'une action du tronc selon l'axe transversal (flexion du tronc), l'axe longitudinal (dévissage des hanches et des épaules vers la gauche pour un joueur droitier) et l'axe antéropostérieur (passage de l'épaule droite au-dessus de l'épaule gauche pour un joueur droitier). À l'impact, le joueur n'est plus en contact avec le sol. Le bras est alors en abduction autour de 100° , en adduction horizontale autour de 5° , le coude est en extension presque complète ($150 - 160^\circ$), le poignet est en extension (15°) et le tronc est en flexion (48° par rapport à l'horizontale) (Fleisig et al., 2003; Whiteside et al., 2013).

La phase de décélération, entre l'impact et la rotation maximale interne (RMI) de l'épaule : après l'impact, la rotation interne de l'épaule et la pronation de l'avant-bras se poursuivent, et la raquette se dirige vers l'avant et vers le bas. Cette phase est considérée comme une phase très violente du service puisqu'elle consiste en un freinage excentrique du tronc et du bras dominant (Kovacs et Ellenbecker, 2011).

La phase d'accompagnement, entre la RMI de l'épaule et la fin du mouvement : elle se caractérise par la fin des actions excentriques. La réception du joueur au sol se fait sur la jambe gauche pour un joueur droitier (Renoult, 2007). Pendant ce temps, la jambe droite monte vers l'arrière (arabesque), ce qui permet un rééquilibrage rapide pour préparer la frappe suivante. La raquette finit sa décélération en continuant sa trajectoire sur la gauche du joueur et vers l'arrière.

2.2.2.2 L'enchaînement segmentaire des vitesses articulaires au sein de la chaîne cinématique du service

Les actions sportives de lancer ou de frappe de balle qui demandent conjointement force et vitesse sont décrites dans la littérature comme des mouvements se déroulant suivant une séquence proximo-distale (Bartlett, 2007; Wagner et al., 2014). Ces mouvements sont initiés par les segments proximaux les plus volumineux, puis progressent vers les segments distaux qui permettent rapidité, amplitude et précision du geste (Bartlett, 2007). Pour que cette séquence soit efficace, chaque segment doit idéalement initier son mouvement lorsque la vitesse maximale du segment adjacent proximal est atteinte (Marshall et Elliott, 2000;

Putnam, 1993). Bien exécutée, cette séquence permet théoriquement d'obtenir une vitesse maximale du segment le plus distal de la chaîne en question. Au contraire, si un segment ne remplit pas correctement son rôle ou s'il n'est pas synchronisé efficacement avec les autres segments, cette séquence n'est pas optimisée (Kovacs et Ellenbecker, 2011) ou nécessite des compensations par les autres segments (Tubez et al., 2015). Ces compensations peuvent potentiellement créer des surcharges sur les tissus et constituent un facteur de risque de blessures (Elliott, 2006; Lintner et al., 2008). Les études scientifiques qui se sont intéressées au service ont alors décrit une chaîne cinématique caractérisée par une augmentation des vitesses linéaires maximales depuis les membres inférieurs jusqu'à la raquette (Figure 2.9) (Elliott et al., 1995; Marshall et Elliott, 2000; Sheets et al., 2011).

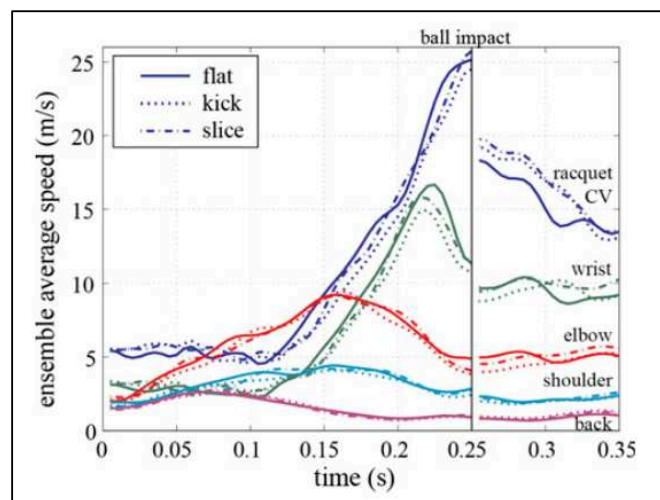


Figure 2.9 – Évolution des vitesses linéaires articulaires au cours du service suivant une séquence proximo-distale, d'après Sheets et al. (2011).

2.2.2.3 L'enchaînement des vitesses angulaires au sein de la chaîne cinématique du service

Un enchaînement dans les vitesses angulaires maximales des articulations a également été identifié lors du service (Fleisig et al., 2003; Marshall et Elliott, 2000; Wagner et al., 2014). Fleisig et al. (2003) ont décrit chronologiquement la séquence suivante chez des joueurs et des joueuses professionnels : extension des genoux, flexion du tronc, rotation longitudinale des épaules, rotation longitudinale des hanches, extension du coude, flexion du poignet et rotation interne de l'épaule (Figure 2.10). En comparant les différentes données de la littérature, deux éléments méritent d'être soulignés. D'une part, si le service commence bien par la création de vitesses angulaires maximales au niveau des membres inférieurs puis au niveau du tronc (Fleisig et al., 2003), toutes les études ont montré que les vitesses maximales d'extension du coude et de flexion du poignet précèdent la vitesse maximale de rotation interne de l'épaule (Figure 2.10) (Fleisig et al., 2003; Marshall et Elliott, 2000; Wagner et al., 2014). Ainsi, pour le membre supérieur, cette séquence ne correspond plus à une véritable séquence proximo-distale. D'autre part, des résultats contradictoires ont été retrouvés en ce qui concerne l'enchaînement précis des rotations au niveau du tronc. Wagner et al. (2014) ont décrit un enchaînement qui semble logique, la vitesse maximale de rotation longitudinale des hanches intervenant avant la vitesse maximale de rotation longitudinale des épaules. En revanche, Fleisig et al. (2003) ont retrouvé une inversion dans l'apparition de ces deux vitesses angulaires

(Figure 2.10). Les divergences entre ces deux études sont vraisemblablement le fait de différences sur le plan méthodologique, avec une analyse du service en 3 dimensions (système optoélectronique) pour la première et une analyse vidéo du service pour la seconde. Par ailleurs, de nombreux travaux de la littérature ont quantifié les vitesses angulaires maximales générées au cours du service des joueurs adultes (Tableau 2.2). Si Whiteside et al. (2013) se sont intéressés à comparer ces vitesses entre des joueuses de différentes catégories d'âge (Tableau 2.2), aucune étude de la littérature n'a entrepris ce travail chez les garçons. **L'étude 1 de cette thèse permettra, d'une part, de décrire l'évolution des vitesses angulaires maximales générées au cours du service en fonction des catégories d'âge chez les jeunes joueurs élités et, d'autre part, de déterminer l'influence du sexe sur ces vitesses en comparant les données mesurées lors des services masculin et féminin.**

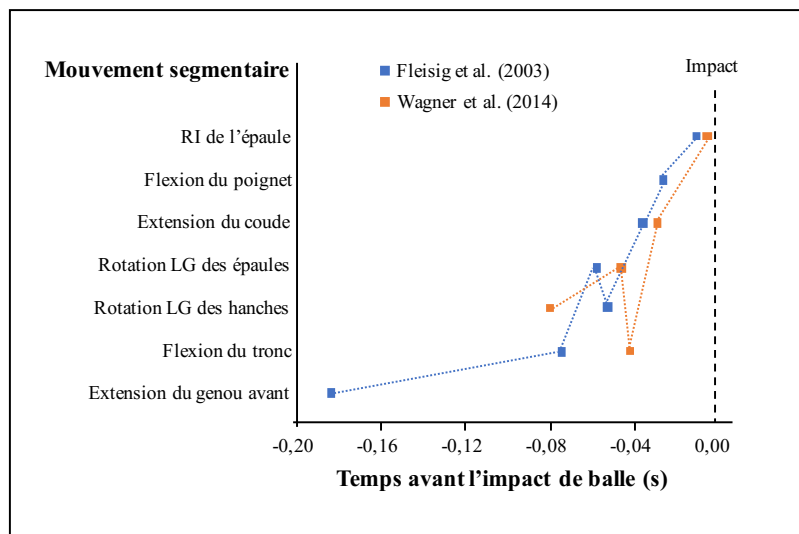


Figure 2.10 – Timing d'apparition des vitesses angulaires maximales au cours du service. RI : rotation interne, LG : longitudinale.

Tableau 2.2 – Vitesses angulaires maximales (moyenne ± écart-type) retrouvées lors du service chez des joueurs et des joueuses adultes de haut niveau, ainsi que chez des jeunes joueuses élites. H : hommes, F : femmes, RI : rotation interne, LG : longitudinale, AV : avant, AR : arrière.

	ADULTES							JEUNES FILLES	
	Elliott et al. (1995)	Fleisig et al. (2003)	Reid et al. (2008)	Whiteside et al. (2013)	Abrams et al. (2014)	Wagner et al. (2014)	Tubez et al. (2015)	Whiteside et al. (2013)	Whiteside et al. (2013)
Population	H	H + F	H	F	H	H	H	U12	U16
Vitesse angulaire maximale									
RI de l'épaule ($^{\circ}\cdot s^{-1}$)	2090 ± 330	H : 2420 ± 590 F : 1370 ± 730	/	2000 ± 297	2368 ± 162	5580 ± 2350	/	1288 ± 355	2165 ± 373
Flexion du poignet ($^{\circ}\cdot s^{-1}$)	1720 ± 180	1950 ± 510	/	1911 ± 264	/	/	/	1164 ± 189	1581 ± 184
Extension du coude ($^{\circ}\cdot s^{-1}$)	1230 ± 180	1510 ± 310	/	1524 ± 144	/	1670 ± 380	/	1147 ± 185	1592 ± 191
Rotation LG des épaules ($^{\circ}\cdot s^{-1}$)	/	870 ± 120	/	715 ± 145	/	/	/	723 ± 190	715 ± 185
Rotation LG des hanches ($^{\circ}\cdot s^{-1}$)	/	440 ± 90	/	/	/	510 ± 110	423 ± 50	/	/
Flexion du tronc ($^{\circ}\cdot s^{-1}$)	/	280 ± 40	/	/	/	910 ± 130	/	/	/
Extension genou AV ($^{\circ}\cdot s^{-1}$)	/	800 ± 400	/	/	/	/	429 ± 62	/	/
Extension genou AR ($^{\circ}\cdot s^{-1}$)	/	/	473 ± 60	/	/	/	519 ± 46	/	/
Extension cheville AV ($^{\circ}\cdot s^{-1}$)	/	/	/	/	/	/	≈ 600	/	/
Extension cheville AR ($^{\circ}\cdot s^{-1}$)	/	/	/	/	/	/	≈ 500	/	/

2.2.2.4 L'action des jambes

2.2.2.4.1 Variables cinématiques de la poussée des jambes

L'action des jambes constitue le point de départ de la chaîne cinématique lors du service (Elliott et Wood, 1983; Martin, 2015; Sheets et al., 2011). Après avoir lancé la balle, le joueur effectue une flexion des chevilles et des genoux dans le but de mettre en tension les muscles des membres inférieurs (Girard et al., 2005). Des angles internes de flexion du genou avant entre 105 et 115° et de flexion du genou arrière entre 92 et 100° ont été rapportés chez des joueurs et des joueuses élites (Tableau 2.3) (Elliott et al., 2013; Reid et al., 2008; Reid, Elliott et Alderson, 2007; Whiteside et al., 2013). La flexion des genoux, qui est facilement observable par les entraîneurs sur le terrain (Elliott et Reid, 2004), est souvent considérée comme un élément essentiel de la poussée des jambes au service (Girard et al., 2007; Reid et al., 2008). Chez les filles, ce critère de performance est très vite acquis dans l'apprentissage du service puisque la flexion maximale des genoux est identique entre des joueuses U12, U16 et professionnelles (Tableau 2.3) (Whiteside et al., 2013). Par ailleurs, aucune étude de la littérature ne renseigne avec précision sur l'amplitude de la flexion des chevilles lors de la mise en charge des membres inférieurs. Cette mise en charge est suivie d'une extension vigoureuse des chevilles et des genoux (Girard et al., 2005), dont le point de départ est généralement synchronisé avec le moment où la raquette est amenée en position haute lors de la phase d'armé (PLHR) (Bonney et al., 2009; Whiteside et al., 2013). Des vitesses maximales d'extension de la cheville avant (entre 600 et 800°·s⁻¹), de la cheville arrière (entre 500 et 750°·s⁻¹), du genou avant (entre 429 et 800°·s⁻¹) et du genou arrière (entre 410 et 690°·s⁻¹) ont été mesurées lors de la poussée des jambes chez des joueurs et des joueuses élites adultes (Fleisig et al., 2003; Reid et al., 2008; Tubez et al., 2015).

Plus globalement, les vitesses verticales de la hanche avant et de la hanche arrière constituent de très bons indicateurs de la qualité et de l'explosivité de la poussée des jambes au service (Sweeney et al., 2012; Whiteside et al., 2013). Ces deux vitesses apparaissent identiques entre les joueurs et les joueuses élites adultes au regard des différentes données de la littérature (Tableau 2.3) (Elliott et al., 2013; Reid, Elliott et Alderson, 2007; Sweeney et al., 2012; Whiteside et al., 2013). En revanche, elles sont significativement inférieures chez des jeunes joueuses élites U12 et U16 par rapport à des joueuses professionnelles adultes (Tableau 2.3) (Whiteside et al., 2013). Ce résultat démontre que l'explosivité de la poussée des jambes s'améliore au cours de la formation des jeunes joueuses, conséquence probable d'une augmentation progressive de la vitesse maximale d'extension des chevilles avec l'âge. Aucune donnée similaire n'existe pour le service masculin, et **la question de l'évolution de la cinématique des membres inférieurs lors du service des jeunes joueurs élites sera traitée dans l'étude 1 de ce travail.**

	Joueuses élites U12 (n = 12)	Joueuses élites U16 (n = 11)	Joueuses professionnelles adultes (n = 8)	Joueurs élites adultes
Caractéristique				
Âge (années)	10,5 ± 0,5	14,6 ± 0,7	21,3 ± 3,8	/
Angle de flexion maximale				
Flexion genou AR (°)	93 ± 10	93 ± 8	92 ± 8	100
Flexion genou AV (°)	105 ± 10	115 ± 7	111 ± 8	105
Vitesse verticale maximale				
Hanche AR (m·s ⁻¹)	1,8 ± 0,2	1,9 ± 0,1	2,3 ± 0,1**§§	2,1
Hanche AV (m·s ⁻¹)	1,4 ± 0,2	1,5 ± 0,1	1,7 ± 0,1**§§	1,6

Tableau 2.3 – Comparaison des variables cinématiques des membres inférieurs en fonction de l'âge des joueuses élites, d'après Whiteside et al. (2013), et synthèse des données retrouvées dans la littérature pour les joueurs élites adultes, d'après Elliott et al. (2013). U12 : moins de 12 ans, U16 : moins de 16 ans, AR : arrière, AV : avant, ** : P < 0,01 pour les différences entre les joueuses U12 et les joueuses professionnelles, §§ : P < 0,01 pour les différences entre les joueuses U16 et les joueuses professionnelles.

2.2.2.4.2 Conséquences d'une action des jambes efficace

La poussée des jambes joue un rôle fondamental dans la performance au service, et l'efficacité de cette action s'améliore avec le niveau d'expertise des joueurs et des joueuses (Bonney et al., 2009; Girard et al., 2005, 2007; Reid et al., 2008). Girard et al. (2005) ont rapporté des forces de réaction verticales supérieures lors de la poussée pour des joueurs de niveau expert par rapport à des joueurs de niveaux intermédiaire et débutant. Pourtant, tous ces joueurs avaient un niveau de puissance des membres inférieurs identique. L'efficacité de la poussée des jambes chez les joueurs experts s'explique alors par une meilleure coordination de l'action des membres inférieurs et par une meilleure utilisation de l'énergie élastique des muscles extenseurs (Girard et al., 2005). En plus de l'augmentation des forces de réaction verticales, l'amélioration de la poussée des jambes aboutit à une augmentation des forces de réaction horizontales, une augmentation du transfert d'énergie des jambes jusqu'à la raquette, une augmentation de la distance parcourue par la raquette lors de l'accélération et finalement, une augmentation de la vitesse de balle au service (Campbell et al., 2014; Girard et al., 2005, 2007; Martin, 2015; Reid et al., 2008; Sweeney et al., 2012; Wong et al., 2014). Par exemple, des corrélations positives et significatives ont été identifiées entre la vitesse de balle au service et la vitesse d'extension du genou arrière ($r = 0,75$ et $P < 0,01$) ou la vitesse verticale de la hanche arrière ($r = 0,65$ et $P < 0,05$) (Wong et al., 2014). De plus, Girard et al. (2007) et Reid et al. (2008) ont étudié le service de joueurs élites en limitant l'action des membres inférieurs (limitation artificielle ou limitation par consigne de la flexion des genoux). Dans ces conditions, ils ont montré une diminution d'environ 15 % de la vitesse maximale de la tête de raquette (Reid et al., 2008) et de la vitesse de balle à l'impact (Girard et al., 2007) par rapport au service normal de ces mêmes joueurs.

Une poussée explosive des jambes permet également d'optimiser la position de l'impact de balle au service. Un impact de balle plus haut ou plus avancé dans le terrain aboutit théoriquement à une ouverture des angles sur les services extérieurs, une augmentation de la marge de sécurité par rapport au filet ou encore une amélioration de la vitesse du service (Brecht et al., 2001; Brody, 2003; Chow et al., 2003; Elliott et Wood, 1983; Martin, 2015;

Vaverka et Cernosek, 2013). Les joueurs et les joueuses adultes de haut niveau frappent la balle à une hauteur qui représente environ 1,5 fois leur taille (Chow et al., 2003; Elliott et Wood, 1983; Girard et al., 2005; Whiteside et al., 2013). Ce résultat n'a pas été retrouvé chez des joueurs adultes de niveau amateur (1,43 fois la taille) (Girard et al., 2005). En revanche, il a été confirmé chez des joueurs et des joueuses élites entre 12 et 16 ans, ce qui en fait un critère de performance commun aux meilleurs joueurs et joueuses indépendamment de l'âge (Reid et al., 2010; Whiteside et al., 2013). Au sujet de la position de l'impact de balle vers l'avant, celle-ci est mesurée par rapport à la position du 1^{er} métatarse du pied gauche lors de la phase d'armé (pour un joueur droitier). Ainsi, les joueurs et les joueuses élites adultes frappent la balle entre 60 et 80 cm devant ce point de repère (Chow et al., 2003; Whiteside et al., 2013). Le manque d'explosivité de la poussée des jambes parfois observé chez les jeunes joueurs et les jeunes joueuses pourrait les contraindre à avoir un impact de balle plus rapproché (48 ± 11 cm pour des joueuses élites U12) (Whiteside et al., 2013).

2.2.2.4.3 Le choix de la technique d'appuis pour les membres inférieurs

L'observation des joueurs et des joueuses de tennis met en avant deux organisations techniques différentes concernant la position des appuis et l'action des jambes au service : le service avec relais d'appuis (RA) et le service sans relais d'appuis (SRA) (Figure 2.11) (Genevois, 2014; Martin, 2015; Reid et al., 2008; Renoult, 2007). Avec le SRA, les appuis restent fixes au sol depuis le début du mouvement jusqu'à la phase d'extension des membres inférieurs et le décollage des pieds. À l'inverse, le RA consiste, après avoir lancé la balle, à déplacer le pied arrière pour le ramener à proximité du pied avant pour ensuite procéder à la mise en charge des membres inférieurs. Le choix d'adopter une technique d'appuis plutôt que l'autre dépend en premier lieu des sensations personnelles du joueur (Renoult, 2007). Cependant, il arrive qu'un entraîneur propose une modification technique lorsqu'il juge que l'organisation utilisée par son joueur est perfectible.

Plusieurs travaux ont été menés chez des joueurs adultes dans le but d'apporter aux entraîneurs des connaissances scientifiques concrètes sur les avantages et les inconvénients biomécaniques de ces deux techniques. D'un côté, une augmentation des forces de réaction horizontales a été rapportée lors de la poussée des jambes avec un SRA (Bahamonde et Knudson, 2001; Elliott et Wood, 1983; Girard et al., 2005). Cette technique favorise ainsi la propulsion en direction du filet après le service, ce qui fournit un avantage non négligeable dans le cas d'un enchaînement service – volée (Martin et al., 2012). D'ailleurs, Renoult (2007) a remarqué que le SRA est davantage utilisé par les joueurs et les joueuses adeptes d'un style de jeu offensif. D'un autre côté, le RA se caractérise par une augmentation de la vitesse d'extension du genou arrière et une augmentation des forces de réaction verticales lors de la poussée des jambes (Bahamonde et Knudson, 2001; Elliott et Wood, 1983; Reid et al., 2008). Dans l'étude d'Elliott et Wood (1983), l'utilisation du service RA permet d'augmenter la hauteur de l'impact de 11 cm. La base de support au sol est plus réduite lors du RA dans la mesure où les pieds sont rapprochés. L'augmentation des forces de réaction verticales permet d'augmenter le moment cinétique du tronc autour de l'axe transverse, et par conséquent d'augmenter la vitesse de balle au service (Martin et al., 2012; Martin, Kulpa, Delamarche et Bideau, 2013). Des résultats contradictoires existent en ce qui concerne ce dernier point puisque d'autres études n'ont observé aucune différence de vitesse du service en fonction de la technique utilisée (Elliott et Wood, 1983; Reid et al., 2008), ni même dans la capacité à servir des aces (Renoult, 2007). Cependant, à l'exception des travaux de Renoult (2007), toutes ces études ont été réalisées en comparant les deux techniques chez les mêmes joueurs. Ceci peut constituer un biais

méthodologique puisque cela signifie que l'une des deux techniques n'était pas utilisée en compétition par le joueur et par conséquent probablement moins bien maîtrisée par ces derniers.



Figure 2.11 – Exemples d'un service RA (Eugénie Bouchard, en haut) et d'un service SRA (Madison Keys, en bas).

Aucune étude biomécanique ne s'est intéressée à la problématique du RA et du SRA chez les jeunes joueurs et les jeunes joueuses élites. De ce fait, les orientations techniques prises par les entraîneurs se basent actuellement sur leur expérience personnelle et sur l'observation des joueurs et des joueuses professionnels (Schönborn, 2002). Dans les premières années de formation, les entraîneurs s'accordent généralement sur deux éléments concernant les membres inférieurs : l'action des jambes est mise de côté pour faciliter l'apprentissage des fondamentaux techniques des membres supérieurs, et le SRA est privilégié pour favoriser l'équilibre et simplifier la coordination segmentaire lors du service (Genevois, 2014; Renoult, 2007). Sous l'effet de l'apprentissage et du développement physique, l'action des jambes se met ensuite progressivement en place tout au long de la formation du joueur (Whiteside et al., 2013).

Les entraîneurs constatent souvent une faible poussée des jambes avec la technique SRA, phénomène notamment observé chez les jeunes filles (Genevois, 2014; Renoult, 2007). Par conséquent, beaucoup d'entraîneurs s'orientent vers le service RA, qui semblerait faciliter la poussée des jambes des jeunes joueurs. Toutefois, l'amélioration de la poussée des jambes avec le RA n'a pas été démontrée d'un point de vue scientifique chez les jeunes joueurs et joueuses élites et reste actuellement à l'état de supposition. **L'étude 2 de ce travail visera à comparer le RA et le SRA chez les jeunes joueurs et les jeunes joueuses élites, afin d'objectiver les avantages et les inconvénients biomécaniques de ces deux techniques sur la performance au service.**

Par ailleurs, la réalisation du RA rend le mouvement plus complexe du point de vue de la coordination entre les membres inférieurs et les membres supérieurs. Des erreurs d'exécution chez les jeunes joueurs sont donc fréquentes. Lors d'un mauvais relais d'appuis (MRA), le

joueur ramène le pied arrière à côté du pied avant (Figure 2.12), et non pas derrière celui-ci (bon relais d'appuis [BRA]) (Renoult, 2007). Les conséquences biomécaniques du MRA ont été évoquées dans la littérature mais n'ont pas été vérifiées : dévissage précoce des hanches, poussée inefficace de la jambe arrière lors de la phase d'armé ou encore position inadéquate du corps au moment de la frappe (Figure 2.12) (Ellenbecker, 2006; Renoult, 2007). **L'étude 2 s'attachera également à déterminer si le MRA entraîne une modification des variables cinématiques et une diminution de la performance lors du service chez les jeunes joueurs et joueuses élites.**



Figure 2.12 – Exemple d'un MRA (à gauche) qui pourrait conduire à une frappe de balle avec un « buste cassé » (à droite), d'après Renoult (2007).

2.2.2.5 L'action du tronc

Le tronc apparaît comme un segment fondamental dans la réalisation du service puisqu'il représente la zone de transmission des forces entre les membres inférieurs et le membre supérieur qui frappe la balle (Maquirriain et al., 2007; Roetert et al., 1996). Des rotations du tronc autour de l'axe longitudinal, de l'axe transversal et de l'axe antéropostérieur sont observées durant le service des joueurs et des joueuses élites (Figure 2.13) (Bahamonde, 2000; Kovacs et Ellenbecker, 2011; Martin, Kulpa, Delamarche et Bideau, 2013). Ces rotations s'opèrent grâce à une contraction puissante des muscles abdominaux (Chow et al., 2009; Maquirriain et al., 2007). Leur efficacité est optimisée en amont par une poussée explosive des jambes (Sweeney et al., 2012; Tubez et al., 2015; Whiteside et al., 2013) et par une mise en tension excentrique des abdominaux au cours de la phase d'armé (Chow et al., 2009; Maquirriain et al., 2007).

Premièrement, un vissage des hanches et des épaules est amorcé vers la droite pour un joueur droitier (axe longitudinal) (Kovacs et Ellenbecker, 2011). Le plus souvent, les épaules tournent davantage que les hanches, ce qui aboutit à la création d'un angle de séparation compris entre 15 et 35° chez les joueurs et les joueuses élites (Figure 2.13) (Elliott et Reid, 2004; Reid et al., 2015; Reid et Giblin, 2015; Whiteside et al., 2013). Le dévissage des hanches et des épaules intervient ensuite avec des vitesses maximales de rotation longitudinale du tronc de l'ordre de 700 à 900°·s⁻¹ (Figure 2.13 et tableau 2.2) (Fleisig et al., 2003; Whiteside et al., 2013). Pour le service féminin, Whiteside et al. (2013) ont constaté que l'angle de séparation diminue progressivement avec l'âge des joueuses (30 ± 7° pour des joueuses U12 contre 17 ± 11° pour des joueuses adultes, P < 0,01) alors que la vitesse de rotation longitudinale du

tronc n'est pas modifiée (environ $700^{\circ}\cdot s^{-1}$). Au baseball, l'augmentation de l'angle de séparation est paradoxalement envisagée comme un critère d'expertise concernant la mécanique du lancer (Chu et al., 2009).

Deuxièmement, le tronc bascule vers l'arrière (axe transversal) pour produire une extension comprise entre 8 et 20° (Abrams et al., 2014; Campbell et al., 2013; Chow et al., 2009). Cette extension est suivie d'une violente flexion vers l'avant (rotation transverse du tronc) (Figure 2.13) qui se déroule entre les phases d'armé, d'accélération et d'accompagnement du service. Après l'impact de balle, la flexion du tronc est responsable d'un déséquilibre important vers l'avant qui provoque l'élévation de la jambe arrière (arabesque) (Reid et Giblin, 2015).

Enfin, une inclinaison latérale du tronc est initiée après le lancer de balle, c'est-à-dire une bascule de l'épaule dominante vers le bas selon l'axe antéropostérieur (Figure 2.13). Lorsque la raquette est amenée en position haute (PLHR), la ligne des épaules forme un angle d'environ 40° avec l'horizontale (Whiteside et al., 2013). La rotation antéropostérieure du tronc, aussi appelée rotation « épaule par-dessus épaule », correspond ensuite à la bascule de l'épaule dominante par-dessus l'épaule non dominante (Figure 2.13). Cette vitesse est significativement plus faible pour des joueuses U12 par rapport à des joueuses professionnelles (respectivement $635 \pm 46^{\circ}\cdot s^{-1}$ contre $700 \pm 55^{\circ}\cdot s^{-1}$, $P < 0,01$), sans doute en raison d'un déficit de force au niveau du tronc et d'une poussée des jambes moins explosive (Whiteside et al., 2013).

D'une manière générale, de nombreux auteurs ont souligné l'importance des rotations du tronc dans une logique d'optimisation de la vitesse du service (Bahamonde, 2000; Elliott et al., 1995; Gordon et Dapena, 2006; Martin, Kulpa, Delamarche et Bideau, 2013; Sprigings et al., 1994; Sweeney et al., 2012). Gordon et Dapena (2006) considèrent par exemple que 40% de la vitesse de la raquette provient de la rotation longitudinale du tronc au début de la phase d'accélération du service (environ $0,1$ s avant l'impact) (Figure 2.14). De leur côté, Martin, Kulpa, Delamarche et Bideau (2013) ont rapporté qu'une augmentation des moments cinétiques du tronc autour de l'axe transverse (phase d'armé) et autour de l'axe antéropostérieur (phase d'accélération) est en lien avec une augmentation de la vitesse du service pour des joueurs experts adultes ($r > 0,70$ et $P < 0,001$).

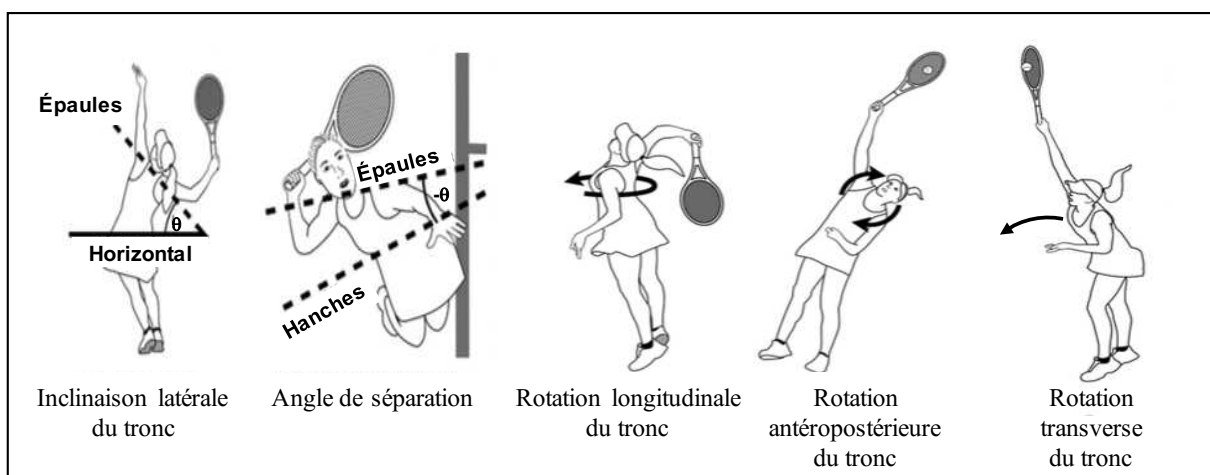


Figure 2.13 – Représentation des différentes actions du tronc lors de la phase d'armé et de la phase d'accélération du service, d'après Whiteside et al. (2013).

2.2.2.6 L'action du membre supérieur dominant

Les segments du membre supérieur dominant correspondent aux segments distaux de la chaîne cinématique du service. Ce sont les segments les plus fins, responsables de mouvements à la fois précis, amples et extrêmement rapides (Bartlett, 2007). Des vitesses angulaires supérieures à $1500^{\circ}\cdot s^{-1}$ pour l'extension du coude, $1900^{\circ}\cdot s^{-1}$ pour la flexion du poignet et $2000^{\circ}\cdot s^{-1}$ pour la rotation interne de l'épaule ont été rapportées pour des joueurs et des joueuses élites (Tableau 2.2). Ce sont les trois rotations les plus rapides de la chaîne cinématique du service et de ce fait, elles sont souvent considérées comme les plus importantes pour produire une vitesse de balle élevée (Fleisig et al., 2003; Wagner et al., 2014; Whiteside et al., 2013). Sprigings et al. (1994), Elliott et al. (1995) ou encore Tanabe et Ito (2007) ont quantifié la contribution des rotations segmentaires du membre supérieur dans la vitesse de la tête de raquette à l'impact. La rotation interne du bras ou de l'épaule (30 à 54 %) et la flexion de la main ou du poignet (26 à 32 %) sont les deux rotations qui contribuent le plus à cette vitesse. La pronation de l'avant-bras joue un rôle plus faible (entre 4 et 15 %) et permettrait avant tout d'optimiser la précision de la frappe de balle. De façon surprenante, l'extension du coude n'a aucune influence sur la vitesse de la raquette au moment de l'impact, Elliott et al. (1995) rapportant même une contribution négative à cet instant (entre 3 et -14 %). Gordon et Dapena (2006) ont partiellement contesté ces résultats, affirmant d'une part que les contributions de l'épaule, du poignet et du coude ne peuvent pas être mesurées de manière précise au moment de l'impact en raison de l'extension quasi complète du bras à cet instant. D'autre part, ils ont souligné que les actions segmentaires du membre supérieur contribuent à augmenter la vitesse de la raquette tout au long du service et pas uniquement au moment de l'impact. Par exemple, la vitesse d'extension du coude est une action essentielle lors de la phase d'accélération du service puisqu'elle est responsable de 50 % de la vitesse de la raquette 0,05 s avant l'impact (Figure 2.14). D'ailleurs, des corrélations significatives ont été identifiées entre l'augmentation de la vitesse d'extension du coude et l'augmentation de la vitesse de balle dans une étude portant sur 12 joueurs experts ($r = 0,71$ et $P < 0,01$) (Wong et al., 2014).

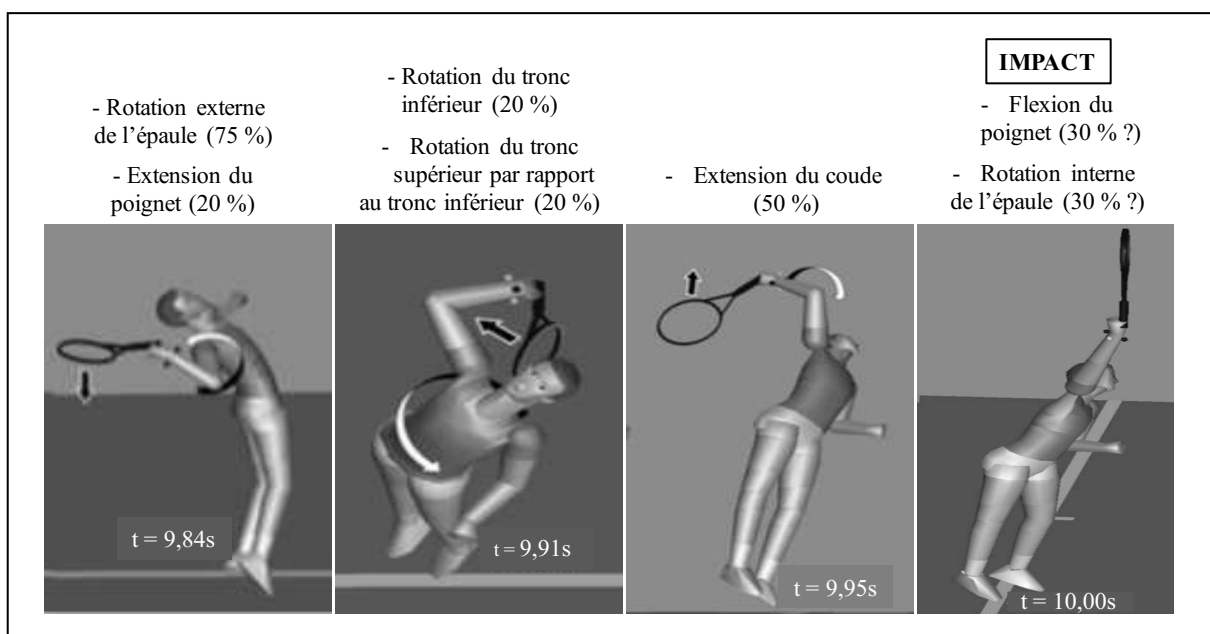


Figure 2.14 – Principales rotations segmentaires contribuant à la vitesse de la raquette lors du service, d'après Gordon et Dapena (2006).

Lors du service féminin, Whiteside et al. (2013) ont montré l'influence de l'âge sur l'évolution de certains paramètres cinématiques du membre supérieur. L'amplitude d'extension du coude à l'impact n'est pas aussi prononcée pour des joueuses U12 que pour des joueuses U16 ou des joueuses professionnelles adultes (respectivement $138 \pm 11^\circ$ contre $154 \pm 11^\circ$ et $153 \pm 8^\circ$, $P < 0,01$), aboutissant de façon logique à une vitesse maximale d'extension du coude également inférieure (Figure 2.15). Whiteside et al. (2013) ont émis l'hypothèse que l'extension quasi complète du coude à l'impact serait un élément technique trop complexe à maîtriser pour les plus jeunes joueuses. En revanche, l'amplitude de la RME de l'épaule au début de la phase d'accélération apparaît être un critère indépendant de l'âge. Dans la mesure où la vitesse maximale de rotation interne de l'épaule est inférieure pour les joueuses U12 (Figure 2.15), les auteurs supposent une mauvaise utilisation de l'énergie élastique de la part de ces joueuses, probablement en lien avec l'utilisation d'une raquette trop lourde et d'une musculature pas suffisamment développée. Enfin, la vitesse maximale de flexion du poignet augmente significativement avec l'âge entre les trois groupes de joueuses (Figure 2.15). Concernant les joueuses U12, celles-ci sont naturellement plus petites que les joueuses U16 (respectivement $1,43 \pm 0,06$ m contre $1,67 \pm 0,05$ m), ce qui les amène à avoir un impact de balle 34 cm plus bas ($2,14 \pm 0,08$ m contre $2,48 \pm 0,09$ m). Au regard des contraintes réglementaires du service (filet, éloignement de la cible), il leur est alors impossible de produire une trajectoire de balle aussi tendue que celle de leurs aînées. La flexion du poignet, qui permet d'augmenter l'inclinaison de la raquette à l'impact et donc de « rabattre » la balle dans le carré de service, est donc une action moins importante pour les joueuses U12. En revanche, la hauteur d'impact est relativement similaire entre les joueuses U16 et les joueuses professionnelles (respectivement $2,48 \pm 0,09$ m contre $2,54 \pm 0,07$ m) alors que la vitesse maximale de flexion du poignet est significativement supérieure pour les joueuses professionnelles (Figure 2.15). Ce résultat semble indiquer qu'une « action efficace de la main » est une acquisition technique relativement tardive au cours de la formation des jeunes joueuses élites. **L'étude 1 permettra de déterminer si l'évolution technique du service des jeunes joueurs élites suit une évolution technique similaire.**

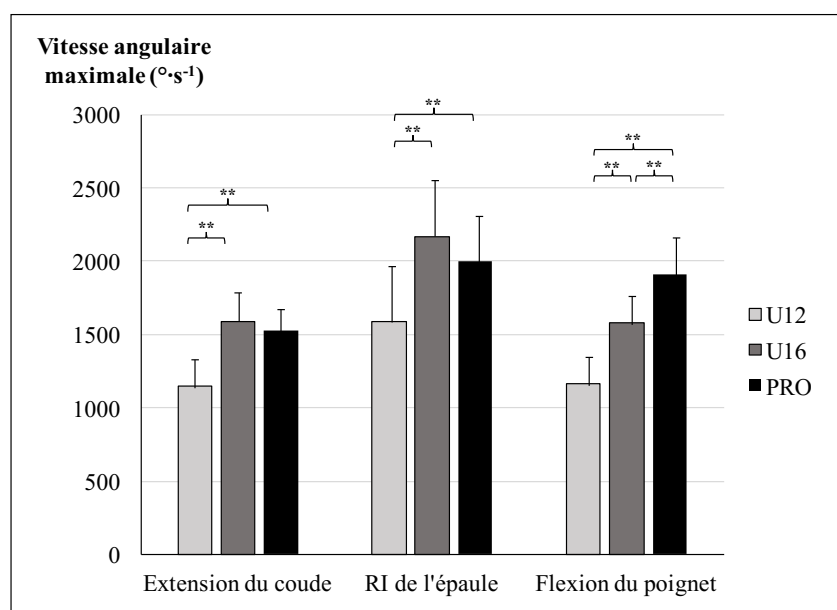


Figure 2.15 – Évolution des vitesses segmentaires du membre supérieur en fonction de l'âge lors du service de joueuses élites, d'après Whiteside et al. (2013). RI : rotation interne, PRO : joueuses professionnelles, ** : $P < 0,01$.

2.2.3 Analyse dynamique de la première balle de service

2.2.3.1 Principe de l'analyse dynamique

Alors que l'analyse cinématique renvoie à une étude descriptive du mouvement, l'analyse dynamique se propose quant à elle d'expliquer le mouvement en s'intéressant aux causes de celui-ci, c'est-à-dire aux forces internes qui s'appliquent sur le système étudié. En biomécanique, les forces internes représentent le plus souvent les efforts musculaires aux articulations. La mesure « directe » de ces efforts musculaires n'est pas commune puisqu'elle suppose des méthodes de mesure invasives qui poseraient des problèmes méthodologiques lors de l'analyse du mouvement sportif (Krosshaug et al., 2005; van den Bogert, 1994). En laboratoire, il est cependant possible d'investiguer ces forces par la méthode dite de « dynamique inverse » (Cahouët et al., 2002). Cette méthode, basée sur une représentation du corps humain comme un ensemble de segments rigides, renvoie au principe que les forces et les moments de forces peuvent être estimés par l'analyse du mouvement qu'ils ont eux-mêmes produit (van den Bogert, 1994). Grâce à la connaissance des données cinématiques (conséquences du mouvement), il est possible de résoudre les équations du mouvement de Newton-Euler et ainsi connaître les forces et les moments de forces qui sont à l'origine du mouvement (causes du mouvement) (Cahouët et al., 2002; van den Bogert, 1994).

Deux approches distinctes de dynamique inverse sont utilisées lors de l'analyse du mouvement. La première approche, nommée « top-down », se propose de résoudre les équations d'équilibre dynamique du mouvement depuis le segment libre vers le segment contraint grâce à la seule connaissance des données cinématiques (Iino et Kojima, 2012). La mesure de ces données cinématiques doit être suffisamment précise pour obtenir une estimation fiable des forces et des moments de forces (Hatze, 2000). La seconde approche, appelée « bottom-up », implique de connaître les forces de réaction du sol en plus des données cinématiques du mouvement (Iino et Kojima, 2012). Elle est généralement plus précise que la méthode « top-down » (Cahouët et al., 2002; Desjardins et al., 1998). Elle pose néanmoins des problèmes méthodologiques dans le cas de l'analyse du service puisque la mesure des forces de réaction du sol nécessite l'utilisation de plateformes de forces qui peuvent perturber le joueur dans la réalisation de son mouvement (Iino et Kojima, 2012). Ainsi, la méthode « top-down » est la méthode la plus utilisée dans les études biomécaniques sur le service (Abrams et al., 2014; Campbell et al., 2013; Elliott et al., 2003; Martin et al., 2014; Noffal et Elliott, 1998; Reid et al., 2008; Reid, Elliott et Alderson, 2007).

La connaissance des forces et des moments de forces se révèle intéressante pour optimiser le geste du service dans la mesure où elle permet d'interpréter la coordination articulaire mise en jeu au cours du mouvement (Bartlett, 2007). Elle possède aussi un intérêt fondamental dans une logique de prévention de la blessure, et ce point sera approfondi dans la section 2.3 de cette revue de littérature.

2.2.3.2 Évolution des forces et des moments de forces au cours du service

Noffal et Elliott (1998) ont décrit l'évolution des forces et des moments de forces au coude et à l'épaule au cours du service de joueurs adultes (Figure 2.16). Lors de la phase d'armé, la rotation externe de l'épaule est initiée par les muscles sous-épineux et petit rond (Escamilia et Andrews, 2009). Ce mouvement, associé à l'abduction et à l'abduction horizontale du bras, conduit à une augmentation progressive des forces antérieure et supérieure à l'épaule et de la

force médiale au coude jusqu'à atteindre un pic proche de la RME de l'épaule (Martin et al., 2014; Noffal et Elliott, 1998; Reid, Elliott et Alderson, 2007). Les muscles grand pectoral, sous-scapulaire, deltoïde antérieur et grand dorsal se contractent ensuite de façon excentrique pour freiner la rotation externe de l'épaule puis de façon concentrique pour déclencher la rotation interne (Elliott, 2006; Escamilia et Andrews, 2009; Ryu et al., 1988; Seeley et al., 2008). L'enchaînement de ces actions musculaires aboutit à un pic de moment de rotation interne au tout début de la phase d'accélération (Elliott et al., 2003; Martin et al., 2014; Noffal et Elliott, 1998; Reid, Elliott et Alderson, 2007). Au même instant, l'épaule du joueur est soumise à un pic de moment d'adduction horizontale tandis qu'un pic de moment de varus s'exerce au niveau du coude (Elliott et al., 2003; Martin et al., 2014; Noffal et Elliott, 1998). À la fin de la phase d'accélération, les actions conjointes de rotation interne et d'adduction horizontale de l'épaule nécessitent une contraction des muscles de la coiffe des rotateurs et du biceps brachial pour stabiliser la tête de l'humérus dans la cavité glénoïdale, ce qui aboutit à un pic de force proximale à l'épaule juste avant l'impact de balle (Escamilia et Andrews, 2009; Martin et al., 2014; Noffal et Elliott, 1998; Reid, Elliott et Alderson, 2007). Lors des phases de décélération et d'accompagnement du service, les muscles de la coiffe des rotateurs restent actifs pour freiner le mouvement du membre supérieur alors que le biceps brachial, le grand dorsal, le deltoïde et le grand dentelé se contractent pour stabiliser l'épaule et la scapula (Escamilia et Andrews, 2009; Ryu et al., 1988; Seeley et al., 2008). L'épaule est alors soumise à des forces inférieure et postérieure ainsi qu'à des moments de forces de rotation externe et d'abduction horizontale (Fleisig et al., 1995; Martin et al., 2014; Reid, Elliott et Alderson, 2007).

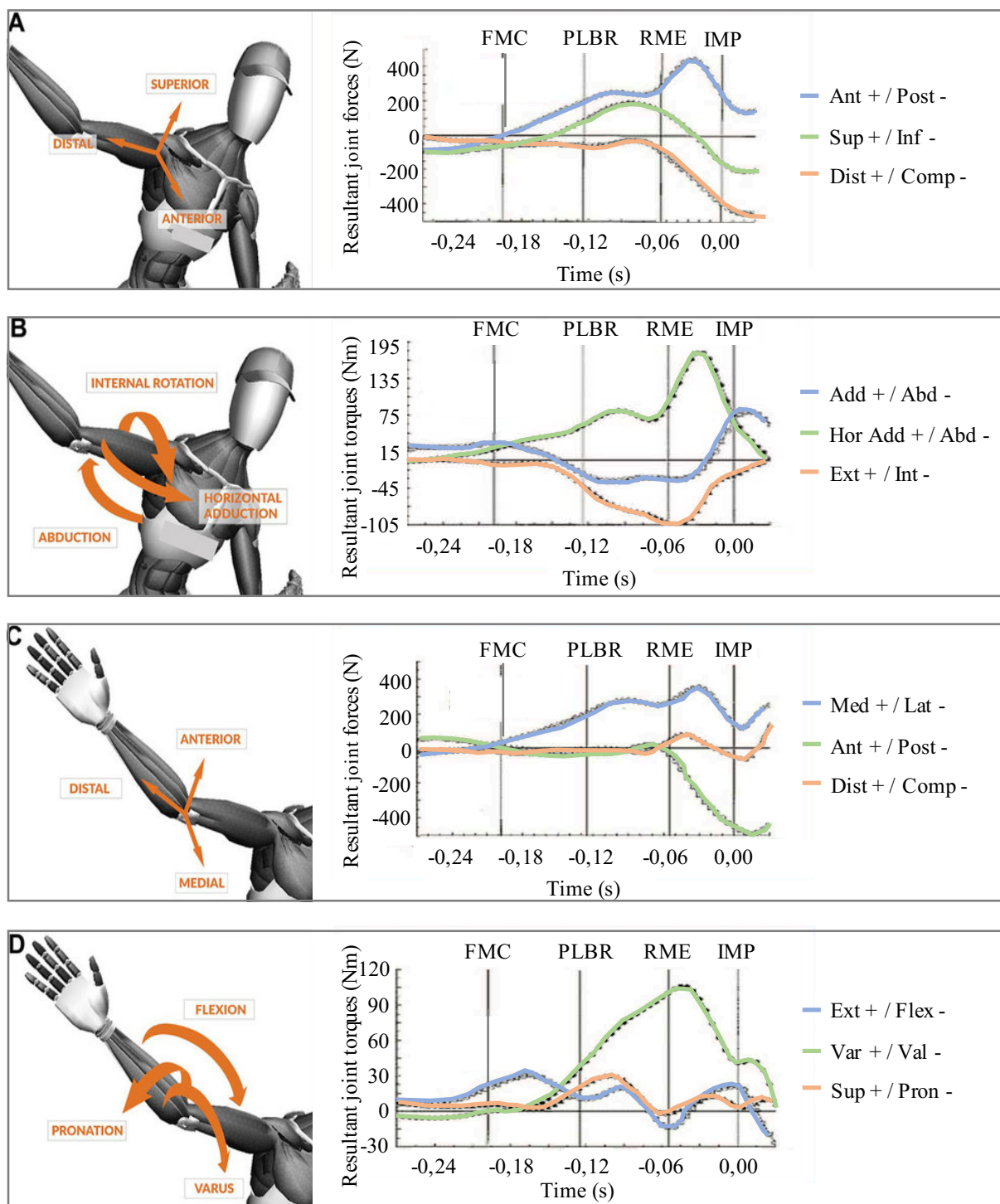


Figure 2.16 – Représentation et évolution des forces (A et C) et des moments de forces (B et D) à l'épaule et au coude au cours du service, d'après Noffal et Elliott (1998) et Luera et al. (2018). FMC : flexion maximale du coude, PLBR : point le plus bas de la raquette dans le dos, RME : rotation maximale externe de l'épaule, IMP : impact.

2.2.3.3 Lien entre les forces, les moments de forces et la vitesse de balle

Les résultats obtenus dans les études s'intéressant à la relation entre la vitesse de balle et les contraintes articulaires sont contradictoires. Elliott et al. (2003) ont réalisé une analyse

vidéo du service de joueurs et de joueuses professionnels lors des Jeux Olympiques de Sydney. Ils ont d'abord montré que la vitesse de balle est significativement plus élevée pour les joueurs que pour les joueuses (respectivement $182,8 \pm 13,9 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ contre $149,3 \pm 13,9 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, $P < 0,01$). Ils ont ensuite établi que les valeurs absolues des pics de force proximale à l'épaule ($P < 0,01$) et de moment de varus au coude ($P < 0,05$) sont significativement supérieures pour les joueurs. Ces auteurs en ont donc déduit qu'une augmentation de la vitesse du service implique nécessairement une augmentation des forces et des moments de forces sur le membre supérieur. Un résultat similaire a été retrouvé au baseball entre la vitesse du lancer et le niveau de contraintes articulaires dans une étude regroupant des collégiens (10 – 15 ans), des lycéens (15 – 20 ans), des étudiants (17 – 23 ans) et des joueurs professionnels (20 – 29 ans) (Fleisig et al., 1999). En revanche, cette idée est partiellement remise en cause dans une étude en laboratoire (système optoélectronique) qui a comparé les contraintes articulaires du membre supérieur lors du service de joueurs adultes amateurs et professionnels (Martin et al., 2014). Les résultats ont fait état de contraintes articulaires globalement inférieures pour les joueurs professionnels, alors que ces derniers avaient une 1^{ère} balle de service significativement plus rapide ($177,8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ contre $143,3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ pour les joueurs amateurs, $P < 0,001$). Un coefficient « d'efficacité » du service a été défini, représentant le ratio entre la vitesse de balle et les pics de forces ou de moments de forces générés au cours du service. Ces ratios étaient moins bons chez les joueurs amateurs (quantité de contraintes supérieure par $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ de vitesse de balle), ce qui laissait supposer pour ces joueurs une technique de service moins performante et une moins bonne utilisation mécanique de la chaîne cinématique.

2.3 L'analyse biomécanique du service pour diminuer le risque de blessures chroniques

2.3.1 Épidémiologie des blessures au tennis

2.3.1.1 Généralités

L'activité physique est largement reconnue pour ses nombreux bienfaits sur la santé (INSERM, 2008). Pour le tennis, la pratique est associée entre autres à une réduction du risque de maladies cardio-vasculaires, une réduction du risque d'obésité ou encore une amélioration des capacités aérobiques (Fernandez-Fernandez et al., 2009; Pluim, 2007). Cependant, la pratique du tennis place également le joueur face à un risque de blessures, quel que soit son niveau de jeu (Bahr et Krosshaug, 2005; Pluim et al., 2006). Certaines de ces blessures sont présentes dans d'autres disciplines sportives et sont à mettre en lien avec l'activité physique en général. D'autres blessures sont en revanche beaucoup plus spécifiques à la pratique du tennis (Pluim et al., 2006). En effet, le tennis est un sport qui demande de produire des actions explosives au niveau des membres inférieurs (accélération, freinages, changements de direction) et des membres supérieurs (service, coups de fond de court) (Kibler et Safran, 2005). La durée d'un match de tennis a un côté imprévisible et en fonction de l'adversaire, du format de jeu, du score ou encore de la surface, celui-ci dure parfois plus de trois heures (Kovacs, 2006). La répétition des mouvements et des frappes de grande intensité inhérente à l'activité peut alors aboutir à des blessures caractéristiques du joueur de tennis, notamment au niveau du tronc et des membres supérieurs (Abrams et al., 2012; Kaffel et al., 2013; Kibler et Safran, 2005).

Parmi l'ensemble des coups, le service est à la fois le plus violent du jeu (Abrams et al., 2011; Kibler et Safran, 2005) mais aussi celui qui est le plus utilisé lors d'un match (Johnson et al., 2006). Il est de ce fait régulièrement mis en cause dans le mécanisme des blessures chroniques du joueur de tennis (Bylak et Hutchinson, 1998; Dines et al., 2015; Kibler et Safran, 2005; Perkins et Davis, 2006). En outre, sa réalisation est très complexe (Bahamonde, 2000; Kovacs et Ellenbecker, 2011), ce qui laisse supposer que le développement d'une technique gestuelle « propre » ou « idéale » est un processus relativement long dans la formation des jeunes joueurs. Pour rappel, une technique gestuelle idéale fait référence à la réalisation d'un mouvement non seulement performant mais aussi le moins traumatisant possible (Elliott, 2006; Schönborn, 2002). **Par conséquent, une question centrale de ce travail de thèse sera de déterminer au travers de l'analyse biomécanique du service les facteurs de risque de blessures des jeunes joueurs.**

2.3.1.2 Méthodologie des études épidémiologiques au tennis

De nombreuses études épidémiologiques ont été menées afin d'améliorer la compréhension et la prévention des blessures induites par la pratique du tennis. Néanmoins, la comparaison de ces études demeure complexe et les résultats proposés sont bien souvent contradictoires. Ils s'expliquent par des différences méthodologiques sur la population d'étude (loisir, élite ou professionnelle ; hommes ou femmes), la durée ou la période de l'étude (sur une saison ou sur une compétition), la définition de la blessure utilisée dans le protocole (douleur, absence de l'entraînement, abandon lors d'une compétition) ou encore la méthode de recueil des blessures (questionnaire individuel ou consultation médicale) (Pluim et al., 2006). Par exemple, les résultats des études épidémiologiques au niveau amateur reflètent généralement les blessures rapportées par les joueurs eux-mêmes. À l'inverse, les blessures des joueurs professionnels font le plus souvent référence aux données recueillies lors des consultations médicales réalisées au cours des tournois. Cette dernière méthode permet d'obtenir des diagnostics précis et des données fiables mais elle peut aussi aboutir à une surestimation de l'incidence des blessures (Pluim et al., 2006). Pour faciliter la comparaison entre les études, un groupe d'experts internationaux a établi un consensus fournissant plusieurs recommandations méthodologiques (Pluim et al., 2009). La blessure a été définie comme « une atteinte physique ou psychologique subie par un joueur lors d'un match ou d'un entraînement de tennis, indépendamment de la nécessité d'une attention médicale ou de l'arrêt de la pratique du tennis ». De plus, la sévérité de la blessure a été définie comme « le temps qui s'écoule entre la blessure et la date de reprise complète de l'entraînement avec la possibilité de jouer en match » (Tableau 2.4).

Durée	0 jour	1 à 3 jours	4 à 7 jours	8 à 28 jours	29 jours à 6 mois	> à 6 mois
Sévérité	Insignifiante	Minimale	Légère	Modérée	Sévère	Long terme

Tableau 2.4 – Évaluation de la sévérité de la blessure en fonction du nombre de jours d'arrêt de la pratique du tennis, d'après Pluim et al. (2009).

2.3.1.3 Incidence des blessures chez les joueurs adultes

Plusieurs études se sont intéressées au nombre de blessures subies par des joueurs et des joueuses élites en fonction de la quantité de pratique à l'entraînement et en compétition (Tableau 2.5) (Colberg et al., 2015; Lynall et al., 2016; Winge et al., 1989). Par exemple, une incidence de 1,6 blessures pour 1000 heures de pratique a été rapportée pour 58 joueurs et joueuses universitaires américains suivis sur une saison sportive (Colberg et al., 2015). Les blessures sont moins fréquentes à l'entraînement, notamment parce que celui-ci se déroule dans un environnement contrôlé et avec une intensité d'exercice inférieure à celle du match (Engebretsen et al., 2013; Lynall et al., 2016; Sell et al., 2014). Ainsi, il semble logique de retrouver une incidence supérieure lorsque l'intérêt se porte uniquement sur la survenue des blessures en compétition (Tableau 2.5). C'est le cas de l'étude de Maquirriain et Baglione (2016) dans laquelle 6 blessures pour 1000 heures de jeu ont été observées dans les matchs de Coupe Davis entre 2006 et 2013. La blessure correspondait à un abandon du joueur pendant un match à enjeu et aboutissait à une indisponibilité moyenne de plus de 70 jours. Ces deux éléments laissent envisager une réelle sous-estimation du nombre total de blessures puisqu'ils révèlent que seules les blessures graves ont été enregistrées. Avec des indicateurs différents, une incidence de blessures nettement supérieure a été constatée chez les professionnels lors des tournois du Grand Chelem : 40,5 blessures pour 1000 matchs joués à l'US Open entre 1994 et 2009 (Sell et al., 2014), 20,7 blessures pour 1000 sets joués à Wimbledon entre 2003 et 2012 (McCurdie et al., 2017), et 29,2 blessures pour 10000 jeux joués à l'Open d'Australie entre 2011 et 2016 (Gescheit et al., 2017). Ces trois derniers résultats démontrent que les joueurs et les joueuses professionnels font face à un risque de traumatisme relativement élevé au cours de la pratique du tennis.

Tableau 2.5 – Incidence et localisation des blessures rapportées chez des joueurs et des joueuses adultes, professionnels ou élites, au cours de différentes études. Pro : professionnel, E : entraînement, C : compétition.

	Winge et al. (1989)	Montalvan et al. (2004)	Sell et al. (2014)	Colberg et al. (2015)	Okholm Kryger et al. (2015)	Lynall et al. (2016)	Maquirriain et Baglione (2016)	Gescheit et al. (2017)	McCurdie et al. (2017)
Population	Élite	Pro	Pro	Élite	Pro	Élite	Pro	Pro	Pro
Femmes (n)	28	300	515	26	19285 matchs	52 équipes	/	> 1000	> 1000
Hommes (n)	68	400	704	32	27658 matchs	38 équipes	1806	> 1000	> 1000
Période du recueil	E+C	C	C	E+C	C	E+C	C	C	C
Incidence de blessures	2,3/1000 h	/	40,5/1000 matchs	1,7/1000 h	34,4/1000 matchs	4,9/1000 sessions	6,0/1000 h	29,2/10000 jeux	20,7/1000 sets
Membres supérieurs (%)	45,8	30,0	36,8	33,0	24,7	27,9	25,0	/	28,1
Epaule (%)	17,4	14,7	12,6	18,0	10,7	13,0	/	/	12,1
Coude (%)	10,9	3,6	6,0	5,0	2,2	7,4	/	/	5,9
Poignet (%)	10,9	11,7	11,8	3,0	8,2	7,6	/	/	9,8
Tronc (%)	/	25,0	12,7	18,0	21,2	17,1	17,0	/	21,0
Abdominaux (%)	/	7,0	3,8	3,0	4,5	/	/	/	5,0
Dos (%)	11,0	18,0	4,7	16,0	15,3	/	/	/	12,4
Membres inférieurs (%)	39,0	45,0	47,8	48,0	49,7	50,0	42,0	/	47,9

2.3.1.4 Incidence des blessures chez les jeunes joueurs

À notre connaissance, aucune étude de la littérature n'a investigué l'influence de l'âge sur la survenue des blessures entre des joueurs adultes et des jeunes joueurs de niveau élite. Malgré tout, la comparaison des données épidémiologiques disponibles pour ces deux populations permet de nous éclairer sur le risque de blessures encouru par les jeunes joueurs (Tableau 2.5 et Tableau 2.6). Une étude longitudinale de deux ans réalisée sur une cohorte de 156 joueurs et joueuses âgés de 8 à 16 ans a montré une incidence générale de 0,5 blessure par joueur et par an (Baxter-Jones et al., 1993). Une étude rétrospective de quatre ans portant sur 45 joueurs et joueuses élites plus âgés (16 à 20 ans) a retrouvé un indicateur supérieur avec en moyenne 2,7 blessures par joueur et par an (Reece et al., 1986). Pluim et al. (2016) et Gescheit et al. (2018) se sont intéressés au nombre de blessures en fonction de la quantité de pratique entre 11 et 18 ans, rapportant une incidence comprise entre 2,7 et 5,4 blessures pour 1000 heures de jeu. Comme chez les adultes, ces indicateurs sont plus élevés lorsque l'intérêt se porte uniquement sur la survenue des blessures en compétition (Tableau 2.6). Ainsi, entre 21,5 et 37 blessures ont été enregistrées pour 1000 matchs disputés lors des championnats nationaux américains U16 et U18 (Hutchinson et al., 1995; Safran et al., 1999). Sur le circuit national brésilien, Silva et al. (2003) ont fait état de résultats plus alarmants puisqu'ils ont dénombré 121 interventions médicales pour 1000 matchs disputés par des joueurs et des joueuses âgés de 11 à 18 ans. Même si, à nouveau, il convient de rester vigilant face à des résultats obtenus avec des méthodologies différentes, la comparaison des données épidémiologiques révèle que les jeunes joueurs et joueuses élites sont tout aussi concernés par les blessures, si ce n'est davantage, que leurs homologues adultes. Ces résultats alertent sur la nécessité d'améliorer les stratégies de prévention des blessures pour ces jeunes joueurs.

Pour répondre à cet enjeu, il est important de déterminer les facteurs de risque et les mécanismes qui amènent un joueur à se blesser, avec l'idée sous-jacente qu'une modification ou une suppression de ces facteurs de risque contribuerait à prévenir l'apparition des blessures (Pluim et al., 2006). Les blessures sportives ont généralement une origine multifactorielle causée par plusieurs facteurs de risque (Bahr et Holme, 2003; Meeuwisse et al., 2007). Selon Elliott (2006), elles peuvent néanmoins avoir une cause mécanique principale. Ainsi, l'analyse biomécanique a été choisie dans ce travail car elle permet d'étudier les facteurs mécaniques qui sont à l'origine des blessures lors de la pratique sportive (Elliott, 1999).

Tableau 2.6 – Incidence et localisation des blessures chez des jeunes joueurs et joueuses élites au cours de différentes études. U12 : moins de 12 ans, U14 : moins de 14 ans, U16 : moins de 16 ans, U18 : moins de 18 ans, NR : nombre de joueurs et joueuses non renseigné, E : entraînement, C : compétition.

	Reece et al. (1986)	Hutchinson et al. (1995)	Safran et al. (1999)	Kovacs et al. (2014)	Kovacs et al. (2014)	Kovacs et al. (2014)	Pluim et al. (2016)	Gescheit et al. (2018)
Population								
Âge ou catégorie d'âge	16 – 20 ans	U16 et U18	U16 et U18	U12	U14	U16	11 – 14 ans	13 – 18 ans
Garçons (n)	24	1440	720	NR	NR	NR	44	58
Filles (n)	21	/	539	NR	NR	NR	29	43
Période du recueil	E+C	C	C	E+C	E+C	E+C	E+C	E+C
Incidence de blessures	2,7/joueur/an	21,5/1000 matchs	37,0/1000 matchs	/	/	/	5,4/1000 heures	2,7/1000 heures
Membres supérieurs (%)	19,9	27,0	27,7	36,0	37,0	24,0	29,2	34,5
Épaule (%)	9,1	9,0	10,7	23,0	25,0	11,0	12,4	11,6
Coude (%)	7,4	8,0	8,5	4,0	3,0	3,0	6,2	6,5
Poignet (%)	2,3	10,0	3,5	9,0	9,0	10,0	8,8	9,9
Tronc (%)	16,5	15,0	15,7	8,0	12,0	19,0	/	26,5
Abdominaux (%)	4	3,0	3,6	4,0	3,0	2,0	/	6,5
Dos (%)	12,5	12,0	12,1	4,0	9,0	17,0	13,3	20
Membres inférieurs (%)	60,8	51,0	52,5	39,0	33,0	44,0	48,7	36,6

2.3.1.5 Localisation et type des blessures

Les blessures des joueurs et des joueuses élites concernent prioritairement les membres inférieurs (de 33 à 61 %), puis les membres supérieurs (de 20 à 46 %) et le tronc (de 8 à 27 %) (Tableau 2.5 et Tableau 2.6). Plus précisément, la blessure au dos est souvent citée comme l'atteinte la plus fréquente et l'épaule représente l'articulation la plus touchée des membres supérieurs (Fu et al., 2018; Gescheit et al., 2018; Kovacs et al., 2014; McCurdie et al., 2017; Montalvan et al., 2004; Okholm Kryger et al., 2015). Selon les études, les poignets, les genoux ou les chevilles sont aussi des articulations régulièrement blessées (Baxter-Jones et al., 1993; Fu et al., 2018; Gescheit et al., 2017; McCurdie et al., 2017; Pluim et al., 2016; Sell et al., 2014). La pratique du tennis est aussi à l'origine de blessures spécifiques au niveau du coude, même si celles-ci concernent plus souvent les joueurs de niveau loisir que ceux de niveau élite (Abrams et al., 2012). La distribution anatomique des blessures peut varier en fonction de l'âge ou du sexe, et ce point est abordé dans la partie relative aux facteurs de risque intrinsèques de blessure (Partie 2.3.3.2).

D'une manière générale, la blessure est définie comme l'évènement qui survient lorsque les contraintes induites par le mouvement sportif dépassent les limites physiologiques des structures anatomiques (Bartlett et Bussey, 2009). Dans la littérature, il est courant de distinguer les blessures en fonction de la manière dont elles se manifestent (Pluim et al., 2009). D'un côté, les blessures aiguës font suite à un évènement précis (par exemple une entorse) ou correspondent à l'apparition d'une douleur soudaine (par exemple une fracture ou déchirure musculaire). D'un autre côté, les blessures chroniques apparaissent plus lentement, sans évènement identifiable et avec une augmentation graduelle de la douleur (Bahr, 2009; Pluim et al., 2009). Le mécanisme de ces blessures met en cause la répétition de microtraumatismes lors de la pratique sportive pour expliquer une altération de la capacité de réparation des tissus et donc une usure progressive des structures anatomiques (Bartlett et Bussey, 2009).

Au tennis, les blessures aiguës concernent essentiellement les membres inférieurs (Abrams et al., 2012; Pluim et al., 2006). Ce sont aussi les blessures les plus fréquentes chez les joueurs adultes (Colberg et al., 2015; Lynall et al., 2016; Sell et al., 2014). À l'inverse, les jeunes joueurs subissent essentiellement des blessures de type chronique (Figure 2.17) (Kibler et Safran, 2005; Pluim et al., 2016). Lors d'un suivi longitudinal de 32 semaines, Pluim et al. (2016) ont souligné qu'elles représentaient 75 % de l'ensemble des blessures contractées par des joueurs et des joueuses âgés de 11 à 14 ans. Ces chiffres sont relativement inquiétants pour des joueurs et des joueuses aussi jeunes dans la mesure où les blessures chroniques font référence à des phénomènes d'usure des structures anatomiques. Ces blessures sont parfois observées au niveau des membres inférieurs (Figure 2.17) (Pluim et al., 2016). Elles se déclarent plus spécifiquement pendant la période de croissance et sont en relation avec la répétition des contraintes subies lors des sprints, des freinages ou des changements de direction (Bylak et Hutchinson, 1998; DiFiori et al., 2014; Kibler et Safran, 2005; Mayle et al., 2009). Toutefois, la grande majorité des blessures chroniques se concentrent sur le tronc et sur les membres supérieurs (Figure 2.17) (Abrams et al., 2012; Kibler et Safran, 2005; Pluim et al., 2016). Elles sont à mettre en lien avec la répétition des frappes au tennis, et plus particulièrement avec celle du service (Abrams et al., 2012; Kibler et Safran, 2005; Perkins et Davis, 2006; Pluim et al., 2006). En effet, il est admis en biomécanique et en médecine du sport que la survenue des blessures chroniques est favorisée par la répétition d'un mouvement sportif qui génère des contraintes mécaniques excessives (Elliott et al., 2003; van den Bogert, 1994). Le service est non seulement le coup le plus utilisé lors d'un match (Johnson et al., 2006; Reid et al., 2008), mais aussi celui qui implique les contractions musculaires les plus fortes et donc les contraintes articulaires les plus élevées au niveau du membre supérieur et du tronc (Chow et

al., 2009; Escamília et Andrews, 2009; Kibler et Safran, 2005; Maquirriain et al., 2007). Ainsi, une première approche pour améliorer la prévention des blessures chroniques chez les jeunes joueurs vise à mieux comprendre l'influence du nombre de répétitions du service sur le risque de blessures chroniques. Ceci permettrait à l'entraîneur d'identifier plus facilement les éventuelles périodes de surmenage de son joueur et conduirait à une meilleure planification des entraînements, des compétitions et des périodes de repos (Jayanthi et al., 2009; Plum et al., 2016). Une seconde approche consiste à utiliser l'analyse biomécanique pour étudier les contraintes générées lors du service, puis identifier les facteurs mécaniques qui jouent un rôle sur le niveau de ces contraintes. **Cette seconde approche a été choisie dans ce travail de thèse, avec pour ambition de fournir aux entraîneurs des éléments techniques concrets pour diminuer les contraintes induites par le service et réduire la survenue des blessures chroniques chez les jeunes joueurs.**

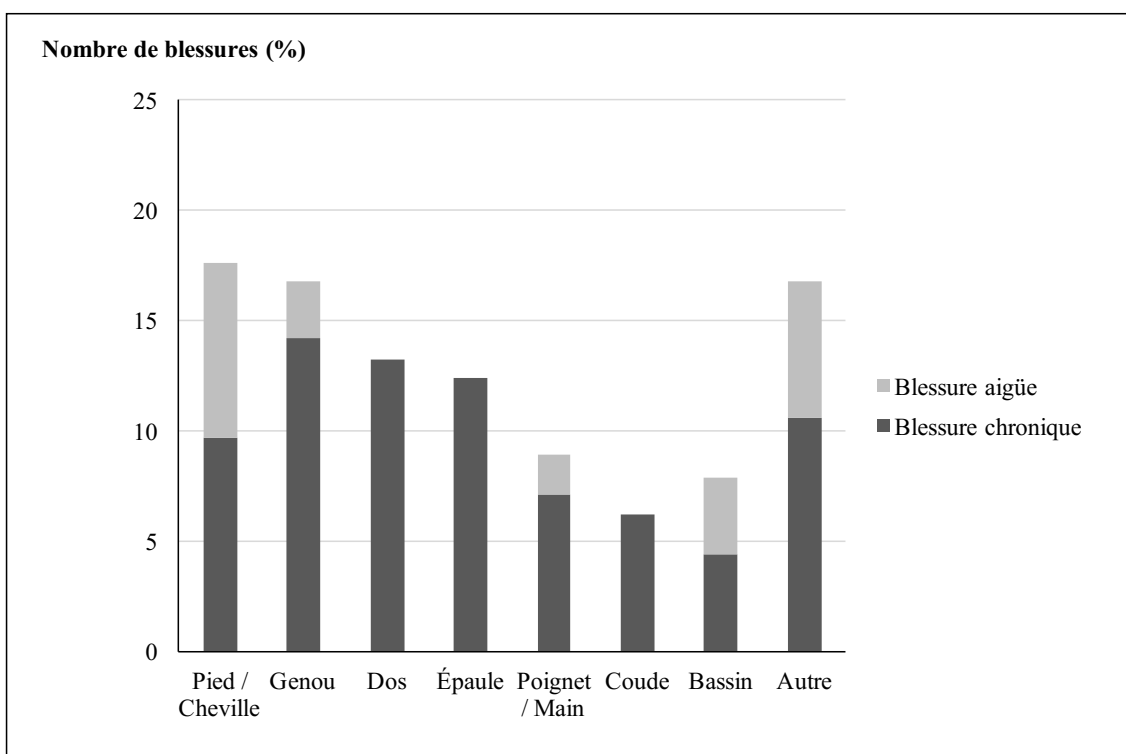


Figure 2.17 – Localisation et type des blessures retrouvées dans une population de jeunes joueurs et joueuses élites, âgés de 11 à 13 ans, d'après Plum et al. (2016).

2.3.1.6 Les conséquences de la blessure

Les problématiques de blessures font partie intégrante de la carrière des joueurs et des joueuses élites. À court terme, la blessure est à l'origine d'une diminution de la performance, voire d'un abandon lors d'un match ou d'un forfait sur un ou plusieurs tournois. Sur le circuit national américain, 15,6 abandons pour 1000 matchs disputés entre 11 et 18 ans ont été attribués à une problématique de blessure (Jayanthi et al., 2009). Naturellement, les enjeux sportifs et financiers sont bien moins importants que pour les joueurs professionnels. En revanche, puisque l'entraînement intensif et la réussite précoce sont deux éléments essentiels de la formation vers le haut niveau, la blessure est une perte de temps dans l'apprentissage et un frein à la progression

(Kibler et Safran, 2005; Reid et al., 2009; Reid, Crespo et al., 2007). Dans l'étude de Pluim et al. (2016), les blessures chroniques ont nécessité un arrêt de l'activité de 17 jours en moyenne chez des joueurs et des joueuses âgés de 11 à 13 ans. Les auteurs ont d'ailleurs souligné que le temps d'arrêt de l'activité ne reflète qu'une partie du réel impact des blessures chroniques sur la santé des joueurs. En effet, ce sont des blessures qui se manifestent de manière progressive et de ce fait, elles n'impliquent pas nécessairement un arrêt immédiat de la compétition ou de l'entraînement (Figure 2.18) (Bahr, 2009; DiFiori et al., 2014). Toujours dans le suivi épidémiologique de Pluim et al. (2016), 12 % des joueurs et des joueuses de l'étude ont déclaré s'entraîner quotidiennement au tennis avec une douleur. De plus, les blessures chroniques peuvent se répercuter beaucoup plus tard dans la carrière du joueur : problèmes de croissance, problèmes de déformations articulaires ou encore augmentation du risque d'arthrose précoce (Bahr et Krosshaug, 2005; DiFiori et al., 2014). Enfin, lorsqu'un jeune joueur subit une blessure grave ou qu'il fait face à de nombreuses récurrences, il peut éprouver de grandes difficultés à retrouver son niveau de jeu, développer des troubles psychologiques (perte de confiance, dépression), arrêter la pratique intensive du tennis et dans le pire des cas, arrêter totalement l'activité (DiFiori et al., 2014; Young et al., 2007).

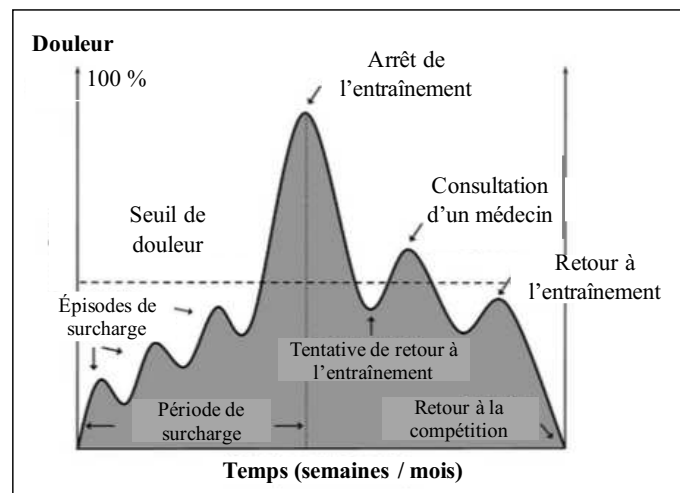


Figure 2.18 – Représentation théorique de l'évolution de la douleur dans le cas d'une blessure chronique, d'après Bahr (2009).

2.3.2 Les blessures chroniques spécifiques des jeunes joueurs et joueuses élités

2.3.2.1 Les articulations du membre supérieur dominant (épaule, coude, poignet)

2.3.2.1.1 Mécanismes à l'origine des blessures chroniques

Au tennis, la réalisation de chaque frappe implique une action rapide et violente de l'épaule, du coude et du poignet (Abrams et al., 2014; Elliott et al., 1995; Fleisig et al., 2003; Wagner et al., 2014; Whiteside et al., 2013). La répétition des frappes, et notamment celle du service, génère alors un stress important sur ces trois articulations (Bylak et Hutchinson, 1998). Ce phénomène est largement repris dans la littérature pour expliquer l'apparition de blessures

chroniques sur le membre supérieur dominant (Bylak et Hutchinson, 1998; Di Giacomo et al., 2016; Dines et al., 2015; Ellenbecker et al., 2009; Kibler et Safran, 2005; Parmelee-Peters et Eathorne, 2005; Perkins et Davis, 2006).

L'épaule est une structure mécanique complexe qui regroupe les articulations scapulo-thoracique, l'articulation sterno-claviculaire, l'articulation acromio-claviculaire et l'articulation glénohumérale (Peat et al., 2008). Lors du service, des moyens de stabilisation statique (structures osseuses, labrum fibrocartilagineux et capsule gléno-humérale) et dynamique (muscles de la coiffe des rotateurs, muscles scapulo-thoraciques et tendon du long biceps) assurent l'équilibre et la stabilité de ces quatre articulations, et notamment le maintien de la tête humérale dans la cavité glénoïdale (Braun et al., 2009). Paradoxalement, l'épaule doit être suffisamment mobile pour permettre au bras d'accélérer la raquette jusqu'à l'impact et de la freiner par la suite. L'enchaînement des contractions concentriques et excentriques des muscles de l'épaule peut conduire à une surcharge des différentes structures de stabilisation de l'épaule (Braun et al., 2009; Ellenbecker et al., 2009; Kibler et Safran, 2005; Kovacs et Ellenbecker, 2011). La répétition de ces actions est susceptible de provoquer de nombreux dysfonctionnements anatomiques, physiologiques ou biomécaniques qui altèrent la performance du joueur et favorisent la survenue d'une blessure chronique (Braun et al., 2009; Cools et al., 2008; Kibler et al., 2013; Kibler et Thomas, 2012; Lädermann et al., 2016).

L'instabilité de l'épaule est le dysfonctionnement le plus souvent observé chez les jeunes joueurs élites (Bylak et Hutchinson, 1998; Kibler et Safran, 2005). Les contraintes importantes générées au cours du service peuvent conduire à une laxité excessive de l'épaule (ou instabilité de l'épaule), ce qui a pour effet d'augmenter les mouvements de translation et de rotation de la tête de l'humérus par rapport à la cavité glénoïdale lors du mouvement. Celle-ci vient alors frotter de façon anormale contre les différentes structures anatomiques qui l'entourent, provoquant une usure progressive de ces structures et l'apparition d'une blessure chronique (Braun et al., 2009; Cools et al., 2008; Kibler et Thomas, 2012).

Les dyskinésies scapulaires correspondent à un autre dysfonctionnement de l'épaule fréquemment retrouvé chez les jeunes joueurs élites. Elles font référence à un positionnement ou à des mouvements anormaux de la scapula par rapport au thorax (Figure 2.19) (Braun et al., 2009; Kibler et Thomas, 2012). Dans un suivi organisé par la Fédération Américaine de Tennis sur plus de 800 joueurs et joueuses âgés de 10 à 17 ans, 75 % des garçons et 65 % des filles démontrent une dyskinésie scapulaire sur le membre supérieur dominant (Ellenbecker, 2014). Même si les causes précises de ce dysfonctionnement font débat dans la littérature, les dyskinésies scapulaires pourraient augmenter les contraintes au cours du service et favoriser l'apparition de blessures chroniques au niveau de l'épaule au travers de différents mécanismes : mauvais transfert d'énergie du tronc vers le bras, diminution de la force des muscles de la coiffe des rotateurs, apparition de conflits entre différentes structures anatomiques et augmentation de la translation de la tête humérale vers l'avant (Braun et al., 2009; Kibler et Thomas, 2012).



Figure 2.19 – Dyskinésie scapulaire chez un jeune joueur de tennis au niveau des deux épaules, caractérisée par une proéminence du bord inférieur de la scapula, d’après Manske et Ellenbecker (2013).

L’articulation du coude fait la jonction entre l’humérus, l’ulna et le radius. Elle est responsable des mouvements de flexion - extension de l’avant-bras sur le bras et de pronation – supination de l’avant-bras et de la main. La stabilité du coude est assurée par les différentes structures ligamentaires et musculo-tendineuses qui viennent s’insérer sur l’articulation, mais aussi par la remarquable congruence des structures osseuses, notamment entre l’olécrâne et la fosse olécrânienne (Cain et al., 2003; Eygendaal et al., 2007; Rettig, 1998). Au début du service, la flexion du coude contribue à positionner la raquette derrière la tête puis à amorcer sa descente dans le dos. Ensuite, l’extension de l’avant-bras permet l’accélération de la raquette vers le haut puis vers l’avant jusqu’à l’impact de balle (Fleisig et al., 2003; Gordon et Dapena, 2006). Le passage très rapide de la flexion à l’extension implique également un passage de l’axe du coude du varus au valgus (Eygendaal et al., 2007). La combinaison de ces deux actions engendre des forces de traction sur le côté médial, des forces de compression sur les parties latérales et des forces de cisaillement sur la partie postérieure de l’articulation. Ce phénomène, appelé « syndrome de valgus extension », est à l’origine de nombreux problèmes ou pathologies observés au niveau du coude des joueurs : instabilité articulaire en lien avec une atteinte du ligament collatéral ulnaire, lésions chondrales ou ostéochondrales, formation d’ostéophytes au niveau des aspects postérieur et postéromédial de l’olécrane ou encore formation de corps étrangers intra-articulaires (Cain et al., 2003; Eygendaal et al., 2007).

Enfin, le poignet est l’articulation distale du membre supérieur. Il se compose en fait de deux articulations, la première reliant le radius à la première rangée des os du carpe (articulation radio-carpienne), la seconde correspondant à l’articulation entre les deux rangées des os du carpe (articulation médio-carpienne). Le poignet permet de positionner la main dans l’espace par des mouvements de flexion – extension et d’abduction – adduction (inclinaison radiale et inclinaison ulnaire). Puisqu’aucune structure musculo-tendineuse ne s’insère sur les os du carpe, sa stabilité est intégralement assurée de manière passive par la configuration géométrique des os et par les structures ligamentaires adjacentes (Rettig, 1998). La flexion du poignet est une action violente du service et contribue à accélérer la raquette vers le haut et vers l’avant juste avant l’impact de balle (Fleisig et al., 2003). L’adduction du poignet permet quant à elle l’accélération latérale de la raquette avant l’impact et de ce fait, cette action intervient surtout

lors du service slicé ou du service lifté pour imprimer un effet à la balle (Mayle et al., 2009). La répétition des frappes avec de l'effet est un mécanisme souvent repris dans la littérature pour expliquer les blessures chroniques du poignet telles que les tendinopathies de l'extenseur ulnaire du carpe, les lésions du complexe fibro-cartilagineux triangulaire ou encore les ténosynovites de Quervain (Bylak et Hutchinson, 1998; Kibler et Safran, 2005; Mayle et al., 2009; Montalvan et al., 2006; Perkins et Davis, 2006). Des prises de raquettes inadaptées (Tagliafico et al., 2009) ou l'utilisation d'un cordage avec une tension trop haute (Montalvan et al., 2006) sont deux autres éléments supposés favoriser l'apparition de ce type de blessure.

2.3.2.1.2 Principales blessures du membre supérieur dominant

Les lésions de la coiffe des rotateurs : ce sont les blessures les plus fréquentes chez les joueurs et les joueuses élites (Bylak et Hutchinson, 1998; Di Giacomo et al., 2016; Kibler et Safran, 2005; Perkins et Davis, 2006). Elles font référence à une tendinite ou à une déchirure partielle voire totale des tendons et des muscles de la coiffe des rotateurs (Kibler et Thomas, 2012). Les lésions se situent essentiellement sur la partie postéro-supérieure de la coiffe des rotateurs, plus précisément à la jonction des tendons des muscles sous-épineux et sus-épineux (Braun et al., 2009). Une instabilité de l'articulation glénohumérale est souvent à l'origine de ce type de blessures chez les jeunes joueurs (Bylak et Hutchinson, 1998; Kibler et Safran, 2005).

Les tendinopathies du coude : l'épicondylite médiale du coude est une blessure spécifique des joueurs et des joueuses de niveau élite, quel que soit leur âge (Bylak et Hutchinson, 1998; Di Giacomo et al., 2016; Dines et al., 2015; Eygendaal et al., 2007; Fu et al., 2018; Kibler et Safran, 2005; Montalvan et al., 2004). La survenue de cette tendinopathie est supposée en lien avec la répétition des mouvements de flexion du poignet et de pronation de l'avant-bras lors du service et du coup droit. Elle concerne typiquement les tendons des muscles rond pronateur et fléchisseur radial du carpe (Dines et al., 2015; Fu et al., 2018; Mayle et al., 2009). En revanche, l'épicondylite latérale du coude, aussi appelée « tennis elbow », est une atteinte peu courante des joueurs élites. L'étiologie de cette blessure fait référence à une sur-activation des muscles de la loge latérale de l'avant-bras en relation avec une mauvaise réalisation technique du revers ou un mauvais choix de matériel (tamis de raquette trop petit, raquette trop lourde). Cette atteinte est surtout retrouvée chez les joueurs de niveau loisir (Abrams et al., 2012; Dines et al., 2015; Eygendaal et al., 2007; Kibler et Safran, 2005).

Les pathologies du ligament collatéral ulnaire : la bande antérieure du ligament collatéral ulnaire constitue le principal stabilisateur du coude lors du service ou des gestes de lancers (Eygendaal et al., 2007). Les contraintes importantes générées pendant la phase d'accélération du service sont susceptibles de provoquer des lésions sur ce ligament, ce qui peut finalement aboutir à une instabilité médiale du coude voire une rupture totale du ligament en question (Cain et al., 2003; Di Giacomo et al., 2016; Eygendaal et al., 2007). Les pathologies du ligament collatéral ulnaire sont plus fréquentes chez les joueurs professionnels adultes (Di Giacomo et al., 2016; Kibler et Safran, 2005). Chez les jeunes joueurs, les contraintes qui s'appliquent sur la partie médiale du coude peuvent engendrer des lésions du cartilage de croissance au niveau de l'apophyse de l'épicondyle médial (Cain et al., 2003; Kibler et Safran, 2005).

L'ostéochondrite disséquante du capitulum : cette blessure chronique est une atteinte spécifique du jeune joueur de tennis au cours de la période de croissance (DiFiori et al., 2014; Eygendaal et al., 2007). Lors de la phase d'accélération du service, l'extension du coude entraîne des contraintes de compression et de cisaillement qui peuvent être à l'origine de lésions

ostéochondrales au niveau du capitulum humérale ou de la tête radiale (Cain et al., 2003; Eygendaal et al., 2007).

Les tendinopathies du poignet : ces blessures s'observent principalement chez les joueurs et les joueuses élites qui utilisent le lift au service, en coup droit ou en revers (Bylak et Hutchinson, 1998; Kibler et Safran, 2005; Montalvan et al., 2006; Tagliafico et al., 2009). La tendinopathie de l'extenseur ulnaire du carpe, qui se caractérise par des douleurs dorso-ulnaires, est l'atteinte la plus courante au niveau du poignet (Bylak et Hutchinson, 1998; Kibler et Safran, 2005; Montalvan et al., 2004; Perkins et Davis, 2006). Elle peut être associée chez les jeunes joueurs à une lésion du complexe fibro-cartilagineux triangulaire ou à un conflit ulno-carpien (Kibler et Safran, 2005).

2.3.2.2 Le tronc

2.3.2.2.1 Mécanismes des blessures chroniques

Le geste du service, via la répétition des mouvements d'extension, d'inclinaison latérale et de rotation longitudinale du tronc, est très largement mis en cause dans la littérature pour expliquer le mécanisme des blessures chroniques au niveau du dos et des muscles abdominaux (Figure 2.20) (Di Giacomo et al., 2016; Dines et al., 2015; Ellenbecker et al., 2009; Kibler et Safran, 2005; Maquirriain et al., 2007; Mayle et al., 2009; Natsis et al., 2012; Tubez et al., 2015).

Le dos est une région complexe composée de nombreuses structures anatomiques (disques, articulations, muscles) qui protègent la colonne vertébrale et permettent la mobilité du tronc. Les blessures du dos sont essentiellement présentes au niveau de la région lombaire, même s'il est parfois difficile de cibler précisément la structure anatomique impliquée dans un événement traumatique (Chow et al., 2009). Les mouvements de rotation du tronc inhérents au geste du service peuvent conduire à une fatigue musculaire ou être à l'origine de surcharges qui dépassent les limites physiologiques des vertèbres, des disques intervertébraux ou des ligaments, provoquant ainsi l'usure progressive de ces différentes structures (Dines et al., 2015).

La ceinture abdominale est composée de 4 groupes de muscles pairs : le muscle grand droit, principal muscle fléchisseur du tronc ; les muscles oblique interne et oblique externe, responsables de la flexion et de la rotation du tronc ; et le muscle transverse, qui joue un rôle dans la stabilisation du pelvis (Maquirriain et al., 2007; Tubez et al., 2015). Au cours du service, les muscles abdominaux sont d'abord largement étirés pour stocker l'énergie élastique, puis ils se contractent puissamment pour amorcer les différents mouvements de rotation du tronc (Chow et al., 2009; Kovacs et Ellenbecker, 2011; Maquirriain et al., 2007). L'enchaînement de ces contractions excentriques et concentriques est considéré comme un moment critique concernant les blessures des muscles abdominaux (Maquirriain et al., 2007).



Figure 2.20 – Le mécanisme reconnu dans la littérature pour les blessures au dos et aux abdominaux fait référence aux mouvements d’extension, de rotation longitudinale et d’inclinaison latérale du tronc lors de la phase d’armé du service.

2.3.2.2.2 Principales blessures du tronc

L’entorse lombaire : c’est l’atteinte du dos la plus fréquente chez les joueurs et les joueuses élites (Bylak et Hutchinson, 1998; Dines et al., 2015; Perkins et Davis, 2006). Elle se traduit cliniquement par des douleurs unilatérales ou bilatérales au niveau des muscles érecteurs du rachis et des muscles multifidus (Perkins et Davis, 2006). En plus des mécanismes déjà évoqués précédemment, une modification de la technique du service ou de la charge d’entraînement (volume ou intensité) sont des éléments avancés dans la littérature pour expliquer l’apparition de ce type de blessure (Dines et al., 2015; Mayle et al., 2009; Perkins et Davis, 2006).

La dégénérescence des disques lombaires et la hernie discale : les disques lombaires sont soumis à des contraintes mécaniques importantes lors du mouvement du service, notamment au moment de l’extension du tronc pendant la phase d’armé (Dines et al., 2015; Perkins et Davis, 2006). Ces contraintes répétées peuvent d’abord provoquer une usure progressive des disques intervertébraux (dégénérescence des disques), puis aboutir à une déchirure de l’anneau fibreux et à un déplacement du disque intervertébral (hernie discale). Typiquement, la hernie discale se caractérise par des douleurs au niveau du dos ou des jambes, altérant à la fois les performances sportives mais aussi la vie quotidienne du joueur (Perkins et Davis, 2006). Chez certains athlètes, elle peut d’abord être parfaitement asymptomatique. Alyas et al. (2007) ont rapporté que 39 % des joueurs et des joueuses élites, impliqués dans leur étude (âge : $17,3 \pm 1,7$ ans), présentaient une hernie discale à l’examen radiologique, alors qu’aucun d’entre eux n’avait d’historique de blessure au niveau du dos. En précisant que la prévalence de la hernie discale était de l’ordre de 20 % dans une population d’athlètes de même âge, ces auteurs ont identifié les jeunes joueurs et les jeunes joueuses de tennis élites comme une population à risque concernant les pathologies liées à l’usure des disques intervertébraux.

La spondylolyse et le spondylolisthésis : la spondylolyse, ou lyse isthmique, correspond à une fracture de fatigue de l'isthme articulaire vertébral. Cette atteinte est souvent retrouvée de façon bilatérale au niveau de la 5^{ème} vertèbre lombaire (Alyas et al., 2007; Barile et al., 2007; Ruiz-Cotorro et al., 2006). Elle concerne davantage les jeunes joueurs que les joueurs adultes, avec une incidence importante observée autour de 15 – 16 ans (Alyas et al., 2007; Barile et al., 2007; Maquirriain et Ghisi, 2006; Ruiz-Cotorro et al., 2006). Dans les cas plus graves, la spondylolyse peut aboutir à un glissement du corps vertébral vers l'avant, appelée spondylolisthésis (Barile et al., 2007; Di Giacomo et al., 2016; Ruiz-Cotorro et al., 2006). Elle correspond à l'une des atteintes les plus sévères du joueur de tennis, avec des temps de repos compris entre deux et cinq mois en fonction de la gravité de la blessure et du délai de prise en charge (Maquirriain et Ghisi, 2006; Ruiz-Cotorro et al., 2006).

L'élongation et la déchirure des muscles abdominaux : ces blessures concernent les muscles grands droits, surtout le muscle du côté controlatéral, et plus rarement les muscles obliques (Bylak et Hutchinson, 1998; Dines et al., 2015; Kibler et Safran, 2005; Maquirriain et al., 2007; Maquirriain et Ghisi, 2006). Ce sont des blessures invalidantes, longues à soigner, et relativement fréquentes chez les joueurs et les joueuses de niveau élite (Maquirriain et al., 2007; Montalvan et al., 2004). Par exemple, dans l'étude de cas de Natsis et al. (2012), une joueuse professionnelle s'est vue imposer par son équipe médicale un repos complet de 3 semaines à la suite d'une déchirure abdominale contractée lors de l'exécution d'un service. Après un repos suffisant pour que la lésion se résorbe, l'entraînement est souvent repris de façon progressive et adaptée en raison des douleurs qui peuvent persister lors de l'exécution du service. Finalement, le retour à la compétition intervient lorsque le joueur est en capacité de servir normalement, ce qui peut correspondre à une période d'absence totale comprise entre 3 et 8 semaines en fonction de la gravité de la lésion musculaire (Dines et al., 2015; Maquirriain et al., 2007; Natsis et al., 2012). Le risque de récurrence pour ces blessures est important, surtout si l'entraînement est repris de façon trop précoce ou si aucun travail de renforcement musculaire spécifique n'a été entrepris (Balus et al., 2012; Maquirriain et al., 2007).

2.3.3 Étiologie des blessures au tennis

2.3.3.1 Modèle de survenue de la blessure chronique

Afin d'améliorer la prévention des blessures au tennis, il est important d'identifier de manière précise les facteurs de risque qui expliquent les prédispositions d'un joueur à se blesser (Bahr et Krosshaug, 2005; Meeuwisse et al., 2007). Ils sont généralement divisés en deux catégories : les facteurs de risque intrinsèques et les facteurs de risque extrinsèques (Bahr et Holme, 2003; Bahr et Krosshaug, 2005; DiFiori et al., 2014; Meeuwisse et al., 2007). D'un côté, les facteurs de risque intrinsèques correspondent aux traits psychosociaux ou aux caractéristiques biologiques de l'individu comme l'âge et le sexe (Figure 2.21) (DiFiori et al., 2014). D'un autre côté, les facteurs de risque extrinsèques font référence au matériel utilisé (raquette, cordage, balles), à la surface du court, à la technique gestuelle ou encore à la quantité de pratique du joueur (Abrams et al., 2012; DiFiori et al., 2014; Pluim et Staal, 2010). Dans la littérature scientifique, l'étiologie des blessures est considérée comme multifactorielle (Bahr et Holme, 2003; Bahr et Krosshaug, 2005; DiFiori et al., 2014; Meeuwisse et al., 2007). Ainsi, un joueur possède des caractéristiques individuelles (facteurs de risque intrinsèques) qui le rendent plus ou moins vulnérable en fonction de son environnement sportif (facteurs de risque extrinsèques). L'interaction complexe entre tous les facteurs de risque peut amener l'athlète à

se blesser sous l'effet d'un évènement déclencheur (Bahr et Holme, 2003). Meeuwisse et al. (2007) ont proposé un modèle dynamique qui permet de mieux comprendre le processus d'apparition de la blessure pour les joueurs et les joueuses de niveau élite (Figure 2.21). Pour ces auteurs, la participation à une activité sportive ou la répétition d'un geste sportif viennent constamment modifier les prédispositions de l'athlète face à la blessure. Ces modifications peuvent avoir un impact positif (facteur protecteur) ou un impact négatif (facteur de risque). Par exemple, un athlète peut se protéger de la blessure en augmentant son niveau de force grâce à un cycle d'entraînement en musculation. Parallèlement, ce même type d'entraînement peut provoquer une fatigue générale ou engendrer des adaptations tissulaires néfastes sur l'organisme, rendant l'athlète plus vulnérable si la pratique est répétée sans une période de repos suffisante. Dans leur approche méthodologique sur l'étude des facteurs de risque de blessures, Bahr et Holme (2003) proposaient d'opérer une distinction entre les facteurs de risques modifiables et les facteurs de risque non modifiables. Si l'étude des facteurs de risque non modifiables comme l'âge ou le sexe reste pertinente pour expliquer le mécanisme des blessures, ces auteurs invitent à s'intéresser plus particulièrement aux facteurs de risque modifiables qui relèvent d'un aspect comportemental ou de stratégies d'entraînement tels que le choix du matériel, la quantité de pratique ou encore la technique gestuelle (Bahr et Holme, 2003; DiFiori et al., 2014). **Dans une logique de prévention des blessures chez les jeunes joueurs et les jeunes joueuses élites, l'étude de la technique gestuelle du service (facteur modifiable) en fonction du sexe et au travers des différentes catégories d'âge (facteurs non modifiables) est placée au cœur de ce travail de thèse.**

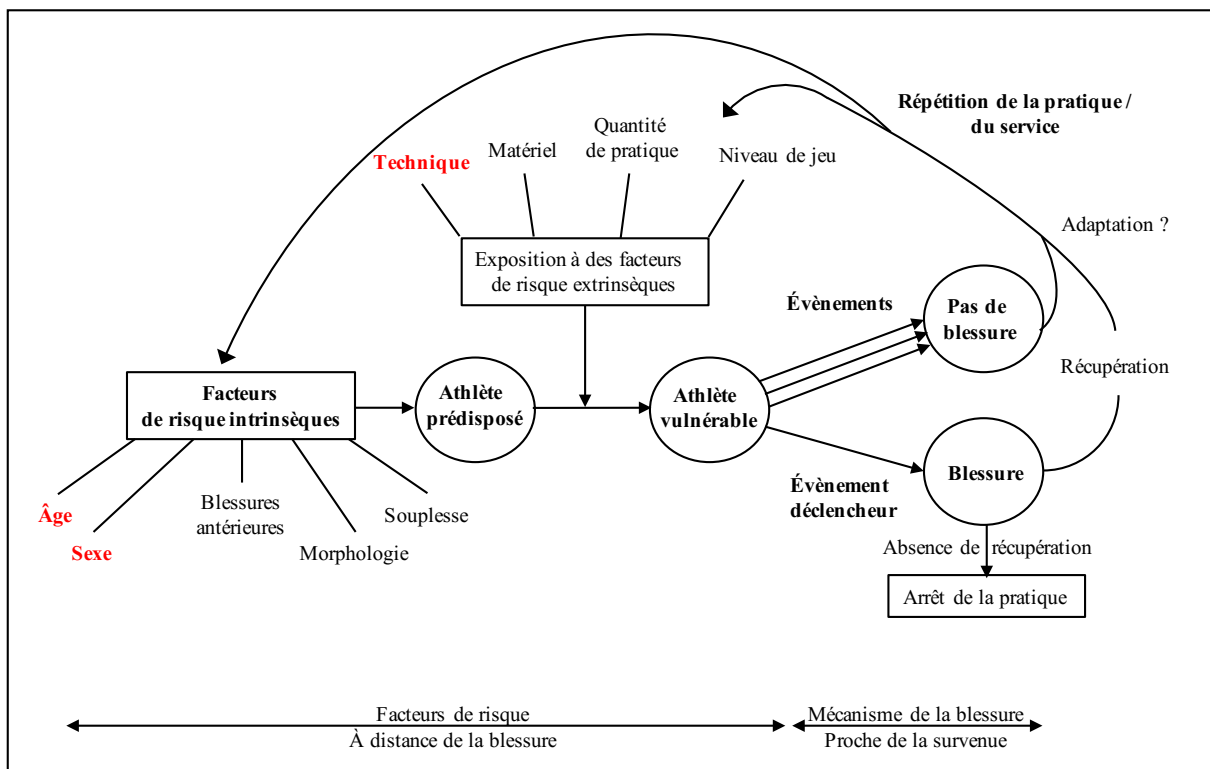


Figure 2.21 – Modèle dynamique de l'étiologie des blessures au tennis, représentant l'interaction entre les facteurs intrinsèques, les facteurs extrinsèques et le risque traumatique, adapté de Meeuwisse et al. (2007).

2.3.3.2 Les facteurs de risque intrinsèques

2.3.3.2.1 L'âge

Les jeunes athlètes sont souvent considérés comme une population à risque de blessures (Bartlett et Bussey, 2009). L'évolution de la pratique sportive au cours des dernières décennies permet d'expliquer la multiplication des blessures chez les jeunes sportifs : l'accès aux activités se fait de plus en plus tôt, la spécialisation devient plus précoce (entraînement dans une seule activité) et les charges d'entraînement sont souvent conséquentes dès les premières années de formation (DiFiori et al., 2014; Jayanthi et al., 2015; Post et al., 2017). Par ailleurs, les nombreux changements anatomiques et physiologiques qui se manifestent au cours de la puberté sont reconnus pour jouer un rôle dans le mécanisme des blessures chroniques des adolescents, notamment lorsque ces derniers pratiquent une activité physique intensive (Bylak et Hutchinson, 1998; DiFiori et al., 2014; Kibler et Safran, 2005; Maquirriain et Ghisi, 2006; Mersmann et al., 2017). Pendant le pic de croissance, le cartilage de croissance situé sur les épiphyses, sur les apophyses et sur les surfaces articulaires devient moins résistant face aux contraintes mécaniques, et la répétition d'une activité sportive favorise alors l'apparition de pathologies du système osseux (DiFiori et al., 2014). Les fractures de fatigue sont un exemple de ce type de pathologies largement retrouvé chez les jeunes joueurs de tennis. Lors d'un suivi épidémiologique de deux ans, réalisé sur 139 joueurs et joueuses élites (20 ± 5 ans), Maquirriain et Ghisi (2006) ont montré que 11 % de la population d'étude avait souffert d'une fracture de fatigue (15 sujets), avec une forte incidence de cette blessure autour de l'âge de 16 ans (Figure 2.22). Par ailleurs, le développement des os, des muscles et des tendons n'est pas homogène au cours de la puberté, ce qui peut conduire à des déséquilibres de force ou de souplesse musculaire (DiFiori et al., 2014; Kibler et Safran, 2005; Mersmann et al., 2017). Ces déséquilibres peuvent aussi perturber l'apprentissage moteur du jeune sportif, et dans le cas du tennis, détériorer l'efficacité technique d'une frappe (Kibler et Safran, 2005). Pour ces différentes raisons, la période de la puberté est considérée comme une période très sensible pour les jeunes joueurs élites en ce qui concerne le risque de blessures.

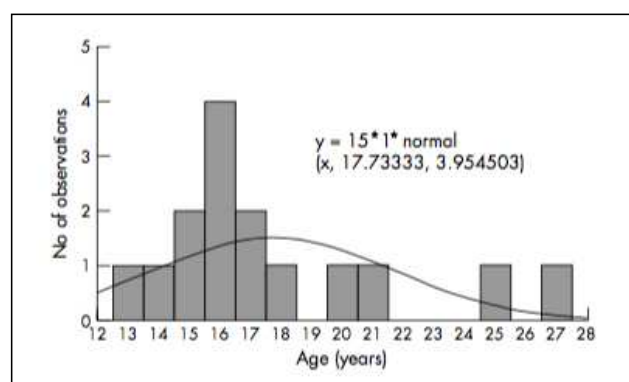


Figure 2.22 – Distribution des fractures de fatigue en fonction de l'âge chez des joueurs et des joueuses de tennis, d'après l'étude de Maquirriain et Ghisi (2006).

Une comparaison des données épidémiologiques en fonction de l'âge a été présentée dans cette revue de littérature, suggérant que les jeunes joueurs et joueuses de tennis élites constituent une population à risque concernant les blessures (DiFiori et al., 2014; Kibler et

Safran, 2005). Lorsque l'intérêt se porte spécifiquement sur les enfants et les adolescents, plusieurs études ont souligné une augmentation de l'incidence des blessures entre l'âge de 12 – 13 ans et l'âge de 18 ans (Gescheit et al., 2018; Jayanthi et al., 2009; Kovacs et al., 2014; Silva et al., 2003). Par exemple, lors d'un suivi épidémiologique de 861 joueurs et joueuses élites, le pourcentage de joueurs et de joueuses ayant contracté au moins une blessure dans l'année de l'étude était de 11 % pour les U12, 28 % pour les U14 et 36 % pour les U16 (Kovacs et al., 2014). L'augmentation du volume d'entraînement au fil des années de formation pourrait expliquer ce résultat. En outre, la répartition anatomique des blessures est sensiblement différente en fonction de l'âge des joueurs et des joueuses. Plusieurs études ont montré que l'épaule et le genou sont les deux articulations les plus souvent atteintes entre 11 et 14 ans, alors que le dos est la région anatomique la plus fréquemment et la plus sévèrement touchée par les blessures à partir de 14 ans (Gescheit et al., 2018; Kovacs et al., 2014; Plum et al., 2016). L'utilisation du service lifté constitue une hypothèse pour expliquer l'augmentation du nombre de blessures au dos avec l'âge. En effet, Abrams et al. (2014) ont montré que ce type de service génère des contraintes supérieures au niveau lombaire par rapport au service à plat. Dans la formation des meilleurs jeunes joueurs et joueuses, l'apprentissage du service lifté débute généralement autour de 11 – 12 ans puis constitue un axe de travail majeur à l'entraînement entre 12 et 15 ans. Ainsi, la répétition d'un geste traumatisant par des joueurs en période de croissance contribue très certainement à l'augmentation du nombre de blessures au niveau de la région lombaire au cours de cette période, qui plus est lorsque la réalisation technique du service reste perfectible (Gescheit et al., 2018).

2.3.3.2.2 Le sexe

L'analyse de la littérature nous place face à des résultats contradictoires lorsqu'il s'agit d'évaluer l'influence du sexe sur la survenue des blessures. Dans une étude danoise rassemblant 89 joueurs et joueuses professionnels, un taux de 2,7 blessures pour 1000 heures de pratique a été rapporté pour les joueurs contre 1,1 blessures pour 1000 heures de pratique pour les joueuses ($P < 0,05$) (Winge et al., 1989). Toutefois, il convient de rester vigilant quant à l'interprétation de ces résultats datant de plusieurs décennies, notamment parce que l'intensité physique a largement évolué sur le circuit professionnel féminin (Antoun, 2007; Rodríguez, 2012). Plus récemment, McCurdie et al. (2017) et Gescheit et al. (2017) ont montré lors des tournois de Wimbledon et de l'Open d'Australie que les joueuses subissent davantage de blessures que les joueurs, ce qui contraste avec les observations faites lors des tournois de Roland-Garros (Montalvan et al., 2004) et de l'US Open (Sell et al., 2014).

Comme chez les adultes, aucun consensus n'émerge de la littérature concernant l'influence du sexe dans l'incidence des blessures chez les jeunes joueurs et joueuses élites. Deux études récentes n'ont révélé aucune différence entre des garçons et des filles âgés de 11 à 13 ans (Van Mechelen et al., 2017) ou de 13 à 18 ans (Gescheit et al., 2018). En analysant rétrospectivement plus de 14000 matchs dans les catégories U12, U14, U16 et U18, Jayanthi et al. (2009) ont retrouvé un taux d'abandons significativement supérieur pour les garçons (16,9 abandons pour 1000 matchs contre 14 abandons pour 1000 matchs chez les filles, $P < 0,01$). Ces résultats contrastent avec ceux de Silva et al. (2003) montrant, au sein des mêmes catégories d'âge, un taux moyen de 30 interventions médicales pour 1000 jeux chez les filles contre 18,6 interventions médicales pour 1000 jeux chez les garçons. Au sujet de la localisation des blessures, Gescheit et al. (2018) ont identifié le dos et l'épaule comme les deux régions anatomiques les plus touchées entre 13 et 18 ans, quel que soit le sexe (Figure 2.23). Ces blessures étaient en revanche plus sévères chez les garçons avec un temps de repos moyen cinq fois supérieur à celui des filles pour les blessures au niveau de l'épaule (respectivement

7,3 ± 1,4 jours contre 1,4 ± 0,9 jours) et trois fois supérieur pour les blessures au niveau du dos (respectivement 15,2 ± 1,4 jours contre 4,6 ± 0,6 jours). Pour rappel, le geste du service est largement mis en cause dans le mécanisme d'apparition des blessures chroniques au niveau de l'épaule (Bylak et Hutchinson, 1998; Ellenbecker et al., 2009; Kibler et Safran, 2005). Puisque le service des garçons est plus rapide que celui des filles (Fernandez-Fernandez et al., 2014; Ulbricht et al., 2016), il paraît logique d'envisager le service masculin comme un geste plus traumatisant pour l'épaule et donc à l'origine de blessures potentiellement plus sévères. Pour confirmer cette hypothèse, **l'étude 1 de ce travail aura notamment pour objectif de comparer les contraintes du membre supérieur générées au cours du service entre des jeunes joueurs et des jeunes joueuses de niveau élite.** Par ailleurs, l'utilisation du service lifté est bien plus marquée dans le tennis masculin que dans le tennis féminin (Antoun, 2007; Gillet et al., 2009; Sheets et al., 2011), ce qui constitue sans aucun doute l'une des raisons pour lesquelles les blessures du dos sont aussi plus sévères chez les garçons. Finalement, un résultat très intéressant du travail de Gescheit et al. (2018) faisait état d'une incidence de blessures aux abdominaux deux fois supérieure pour les jeunes joueuses (Figure 2.23). Si les auteurs de l'étude rappellent que le geste du service joue un rôle important dans l'apparition de ce type de blessures, aucun élément objectif n'était avancé pour expliquer la différence observée entre les deux sexes. D'après Ellenbecker (2006), la réalisation d'un MRA pourrait être une erreur technique au service à l'origine d'une augmentation du risque de blessures aux abdominaux, mais cette hypothèse n'a jamais été confirmée scientifiquement. **Grâce à une comparaison biomécanique du service masculin et du service féminin, l'étude 1 de ce travail de thèse s'intéressera à l'identification des éléments techniques qui pourraient expliquer la raison pour laquelle les joueuses se blessent plus régulièrement aux abdominaux que les joueurs.** De plus, **l'étude 2 abordera la question de la technique des membres inférieurs au service, notamment pour déterminer si le MRA peut être considéré comme une technique d'appuis potentiellement traumatisante pour les abdominaux.**



Figure 2.23 – Distribution des blessures (en %) chez les jeunes joueurs et joueuses élites, d'après Gescheit et al. (2018).

2.3.3.2.3 Autres facteurs de risque intrinsèques

L'historique de blessure : Un récent consensus concernant les jeunes sportifs élités a établi qu'un antécédent de blessure sur une région anatomique donnée est l'un des principaux facteurs de risque pour développer une nouvelle blessure dans cette région (DiFiori et al., 2014). Plusieurs études ont confirmé ce phénomène chez les jeunes joueurs et les jeunes joueuses de tennis (Hjelm et al., 2012; Kovacs et al., 2014; Van Mechelen et al., 2017). La mise en place d'un protocole de soins inadapté ou une reprise trop précoce de l'entraînement après une blessure sont deux raisons évoquées dans la littérature pour expliquer sa récurrence (DiFiori et al., 2014; Hjelm et al., 2012; Maquirriain et al., 2007; Natsis et al., 2012). Dans le cas d'une blessure chronique, une mauvaise interprétation des causes de la blessure initiale constitue un facteur de risque de récurrence (DiFiori et al., 2014; Hjelm et al., 2012; Natsis et al., 2012). L'analyse biomécanique permet de mieux comprendre les mécanismes d'apparition de ce type de blessures, notamment grâce à l'identification des facteurs techniques qui augmentent le risque de blessures lors de la réalisation d'un geste sportif (Chan et al., 2008; Elliott, 1999). Ainsi, l'analyse biomécanique peut fournir au joueur et à l'entraîneur des informations précieuses sur les modifications techniques à envisager à la suite d'une blessure chronique pour limiter le risque de récurrence.

L'amplitude de mouvement : La répétition des frappes au tennis implique des adaptations spécifiques sur certaines structures anatomiques. Au niveau de l'épaule, il est fréquent d'observer une perte d'amplitude en rotation interne (GIRD) qui semble être en lien avec une raideur acquise de la partie postérieure de la capsule articulaire (Braun et al., 2009; Ellenbecker et al., 2002; Seroyer et al., 2009; Vad et al., 2003). Ce phénomène s'observe avant le début de la puberté (Gillet et al., 2017) et a tendance à s'amplifier ensuite avec l'âge et le nombre d'années de compétition (Kibler et al., 1996). Même si une augmentation de l'amplitude en rotation externe peut être concomitante, la diminution d'amplitude en rotation interne aboutit le plus souvent à une perte d'amplitude articulaire totale (Figure 2.24) (Gillet et al., 2017; Kibler et al., 1996). Cette altération fonctionnelle de l'épaule a été identifiée comme un facteur de risque de blessures chez des joueurs de tennis professionnels (Vad et al., 2003). Par ailleurs, les jeunes joueurs et les jeunes joueuses sont des sujets pour lesquels il est fréquemment constaté une perte de souplesse lombaire ou une perte de mobilité articulaire de la hanche (Kibler et Safran, 2005). Au niveau de la hanche, une diminution de la mobilité articulaire serait mise en cause dans l'apparition de blessures au niveau du dos ou au niveau des abdominaux (Vad et al., 2003; Young et al., 2014). De leur côté, Campbell et al. (2014) ont objectivé une perte de mobilité lombaire en extension de l'ordre de 10° pour des jeunes joueurs avec des antécédents de blessure au dos par rapport à des jeunes joueurs sans historique de blessures.

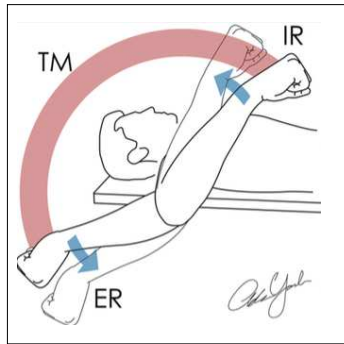


Figure 2.24 – Représentation schématique au niveau de l'épaule de la perte d'amplitude en rotation interne et du gain d'amplitude en rotation externe parfois associé, d'après Seroyer et al. (2009). ER : rotation externe, IR : rotation interne, TM : amplitude totale.

Les déséquilibres musculaires : Les actions répétitives liées à la pratique du tennis sont également à l'origine de déséquilibres musculaires importants (Ellenbecker et al., 2009). Le coup droit et le service représentent plus de la moitié des frappes jouées lors d'un match (Johnson et al., 2006). L'exécution de ces deux coups implique une action importante de l'articulation glénohumérale en rotation interne (Ellenbecker et al., 2009; Elliott et al., 1995, 1997). Avec l'âge, il n'est pas rare d'observer une augmentation plus importante de la force des muscles rotateurs internes de l'épaule par rapport à celle des muscles rotateurs externes (Ellenbecker, 1991; Ellenbecker et Roetert, 2003; Kibler et Thomas, 2012; Saccol et al., 2010). Ce déséquilibre de force entre les muscles agonistes et antagonistes de l'épaule compromet la stabilité de l'articulation lors de la phase d'accélération du service et diminue la capacité à ralentir la raquette lors de la phase de décélération (Braun et al., 2009; Ellenbecker et Roetert, 2003; Hurd et Kaufman, 2012; Kibler et Thomas, 2012).

La pratique intensive du tennis peut aussi provoquer d'importants déséquilibres au niveau des muscles du tronc. Grâce à une évaluation isocinétique, Timm (1995) a montré que la force d'extension du tronc était légèrement supérieure à la force de flexion du tronc dans la population normale. Avec un protocole similaire, Roetert et al. (1996) ont mis en évidence que ce rapport était inversé pour des joueurs et des joueuses de tennis âgés de 13 à 17 ans (ratio flexion / extension compris entre 102 et 122 %). Ces résultats sont à rapprocher de ceux de Sanchis-Moysi et al. (2010) sur des joueurs professionnels qui ont démontré une hypertrophie des muscles grands droits de l'ordre de 58 % par rapport aux sujets d'un groupe témoin qui ne pratiquaient pas le tennis. Dans cette même étude, les joueurs professionnels présentaient également une hypertrophie du muscle grand droit côté non-dominant de l'ordre de 35 % par rapport au muscle grand droit côté dominant. Ces différents déséquilibres musculaires sont envisagés comme des facteurs de risque de blessures (Roetert et al., 1996; Sanchis-Moysi et al., 2010). Pour les joueurs élités, ils sont vraisemblablement à mettre en lien avec le geste du service puisque Chow et al. (2009) ont rapporté des activations musculaires maximales très différentes entre le grand droit non-dominant (92 % de la contraction maximale volontaire isométrique), le grand droit dominant (56 %) et les érecteurs du rachis (entre 51 et 72 %).

2.3.3.3 Les facteurs de risque extrinsèques

2.3.3.3.1 Le niveau de jeu

Trois études épidémiologiques menées sur de larges populations de joueurs et de joueuses adultes amateurs ont rapporté des résultats contradictoires à propos de la survenue des blessures en fonction du niveau de jeu (Jayanthi et al., 2005; Kaffel et al., 2013; Veijgen, 2007). Dans l'étude de Kaffel et al. (2013), les joueurs et les joueuses ayant contracté une blessure sur le membre supérieur dominant dans les cinq années précédant l'enquête ont statistiquement obtenu un meilleur niveau (meilleur classement français) que ceux qui n'ont déclaré aucune blessure ($P < 0,001$). Inversement, Veijgen (2007) a estimé que le niveau d'expertise est un facteur de protection face aux blessures du membre supérieur, et ce résultat a été confirmé dans une population de jeunes joueurs et joueuses loisirs âgés de 12 à 18 ans (Hjelm et al., 2012). À notre connaissance, aucun suivi épidémiologique n'a investigué l'influence du niveau de jeu sur la survenue des blessures dans une population constituée à la fois de jeunes joueurs loisirs et de jeunes joueurs élites. Cette problématique peut être appréhendée en comparant les résultats obtenus pour chacune de ces populations, et à la condition d'utiliser un indicateur qui exprime le nombre de blessures en fonction de la quantité de pratique. Ainsi, l'incidence de blessures pour des jeunes joueurs loisirs est de 1,2 à 1,5 blessures pour 1000 heures de pratique (Hjelm et al., 2012; Spinks et al., 2006) alors que cet indicateur est de 2,7 à 5,4 blessures pour 1000 heures de pratique pour des jeunes joueurs élites (Gescheit et al., 2018; Plum et al., 2016). L'augmentation du risque de blessures avec le niveau de jeu ne paraît pas surprenante au regard des exigences physiologiques et biomécaniques inhérentes à la pratique du tennis de haut niveau (Kibler et Safran, 2005).

2.3.3.3.2 La quantité de pratique

L'augmentation de la quantité de pratique a été décrite comme un facteur de risque de blessures chroniques chez le jeune sportif, quelle que soit la discipline pratiquée (DiFiori et al., 2014; Jayanthi et al., 2015; Post et al., 2017). Ce résultat a été confirmé au tennis dans une étude portant sur 73 joueurs et joueuses âgés de 11 à 13 ans et de niveau national (Van Mechelen et al., 2017). Plus que la quantité de pratique, c'est avant tout l'augmentation de la répétition de gestes violents et potentiellement traumatisants qui peut conduire à l'augmentation du risque de survenue d'une blessure chronique. Par exemple, une relation a été identifiée au baseball entre l'augmentation du nombre de lancers effectués au cours d'une saison et l'apparition de douleurs à l'épaule et au coude (Lyman et al., 2002). Le service est défini comme un geste traumatisant (Abrams et al., 2011; Kovacs et Ellenbecker, 2011), et l'importance du nombre de répétitions de cette action ne doit pas être négligée dans le processus de blessure chronique du joueur. Deux études ont rapporté que les joueurs et les joueuses élites juniors (U18) disputent entre 50 et 60 matchs de simple au cours d'une saison, avec en moyenne 72 à 94 services par match pour les garçons et 64 à 86 services par match pour les filles (Kovalchik et Reid, 2017; Myers et al., 2016). Par conséquent, les jeunes joueurs frappent plus de 4000 services et les jeunes joueuses plus de 3000 services au cours d'une même saison. Ces chiffres sont nettement sous-estimés puisqu'ils n'incluent pas les données concernant la pratique du double (Reid et al., 2008). En outre, la connaissance du nombre exact de services effectués durant l'année implique une investigation précise des volumes et des contenus d'entraînement (Reid et al., 2008), et ces données sont évidemment très difficilement quantifiables.

Si aucune étude de la littérature ne s'est intéressée au nombre de matchs disputés dans les plus petites catégories d'âge, nous avons mené une recherche préliminaire à ce sujet chez les meilleurs jeunes joueurs et joueuses français. Grâce au site de la Fédération Française de Tennis (www.fft.fr), le nombre de matchs officiels en simple a été récupéré pour tous les vainqueurs, finalistes et demi-finalistes des championnats de France en 2016, 2017 et 2018 (catégories U12, U14, U16 et U18). L'analyse de ces données montre que les meilleurs joueurs et joueuses nationaux disputent en moyenne 68 matchs au cours d'une saison sportive (Figure 2.25). Cette quantité de matchs est supérieure à celle des juniors mais aussi à celle des joueurs et des joueuses professionnels (Kovalchik et Reid, 2017; Myers et al., 2016), ce qui confirme que les jeunes joueurs élites sont impliqués dès l'âge de 11 ans dans une pratique compétitive très intense (Maquirriain et Ghisi, 2006).

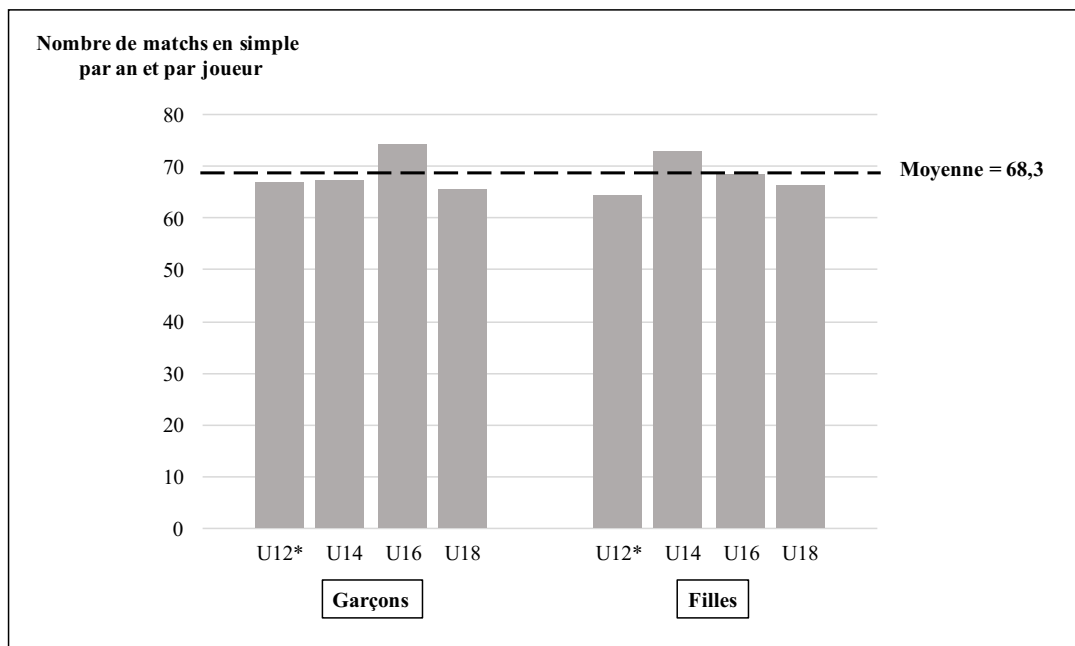


Figure 2.25 – Nombre de matchs disputés en simple sur une saison sportive par les vainqueurs, finalistes et demi-finalistes des championnats de France 2016, 2017 et 2018 (* : en 2016 et 2017, les championnats de France 11/12 ans ont été organisés par équipe).

Naturellement, des volumes d'entraînement conséquents viennent s'insérer en parallèle de ce programme de compétition. Dans l'étude de Plum et al. (2016), des joueurs et des joueuses âgés de 11 à 13 ans et de niveau national avaient un volume d'entraînement hebdomadaire de 9 heures en moyenne, c'est-à-dire quatre fois plus que le temps dédié à la compétition. Le service n'est évidemment pas le seul coup travaillé pendant les entraînements, et l'entraîneur s'attache à développer tout un ensemble de qualités techniques, tactiques, physiques et mentales pour faire progresser son joueur. Toutefois, en partant du postulat qu'il est un coup extrêmement complexe à réaliser et à maîtriser (Bahamonde, 2000; Kovacs et Ellenbecker, 2011; Wagner et al., 2014), il paraît logique de supposer que de très nombreuses séances d'entraînement sont consacrées à l'apprentissage et à l'optimisation du service. La répétition d'un geste potentiellement traumatisant, qui plus est pour un joueur en période de croissance, est un élément à prendre avec beaucoup de considération de la part de l'entraîneur (Kibler et Safran, 2005). Dans une logique de formation vers le haut niveau, il doit ainsi

planifier correctement les entraînements pour répondre à une double problématique : d'une part, optimiser le plus rapidement possible un coup qui s'avère être fondamental dans la performance à court, moyen et long terme ; d'autre part, éviter les surcharges de travail liées à la répétition du service pour préserver l'intégrité physique du joueur et ne pas freiner sa progression.

2.3.3.3.3 Les contraintes articulaires

Les contraintes unidirectionnelles de compression (raccourcissement), de distraction (allongement), de cisaillement (déformation) et les contraintes de rotation (torsion) tendent à déformer les structures articulaires lors d'un mouvement sportif (Bartlett et Bussey, 2009). La répétition de ces contraintes est un mécanisme souvent mis en cause dans la littérature scientifique pour expliquer l'apparition des blessures chroniques (Archambault et al., 1995; Kannus, 1997; van den Bogert, 1994). Pour les tendinopathies par exemple, une mise en charge importante et répétée des structures tendineuses entraînerait une altération de la matrice extracellulaire via un mécanisme de déchirure des fibrilles et de dénaturation du collagène (Mersmann et al., 2017). Plusieurs études ont quantifié les contraintes articulaires générées au cours du service (Abrams et al., 2014; Elliott et al., 2003; Martin et al., 2014; Noffal et Elliott, 1998; Reid, Elliott et Alderson, 2007), avec des résultats parfois difficiles à comparer en raison des différences méthodologiques concernant la modélisation du geste du service ou la manière de collecter les données (Reid, Elliott et Alderson, 2007). Selon les études, les contraintes articulaires mesurées font référence à la quantité moyenne de force générée au cours des différentes phases du service par unité de temps (Reid, Elliott et Alderson, 2007), à l'intensité des forces et des moments de forces lors de la RME de l'épaule (Elliott et al., 2003) ou encore aux valeurs maximales de forces et de moments de forces retrouvées sur l'ensemble des phases du service (Elliott et al., 2003; Fleisig et al., 1999; Martin et al., 2014; Noffal et Elliott, 1998; Reid, Elliott et Alderson, 2007). Pour interpréter le risque de blessures lié à l'exécution du service, l'analyse des valeurs maximales de forces et de moments de forces semble pertinente dans la mesure où elles représentent les contraintes susceptibles de dépasser les limites physiologiques des structures articulaires (Elliott et al., 2003; Fleisig et al., 1995, 1998; Martin et al., 2014). Des pics de force antérieure à l'épaule de 167 à 292 N, de force proximale à l'épaule de 364 à 608 N, de moment de rotation interne de l'épaule de 23 à 94 Nm, de moment d'adduction horizontale de l'épaule de 68 à 110 Nm et de moment de varus au coude de 58 à 106 Nm ont été rapportés pour le service de joueurs et de joueuses adultes experts (Elliott et al., 2003; Noffal et Elliott, 1998; Reid, Elliott et Alderson, 2007). Dillman et al. (1995) ont estimé qu'un moment de force supérieur à 50 Nm au niveau d'une articulation du membre supérieur peut être considéré comme potentiellement dangereux pour l'intégrité physique du joueur. Ainsi, pour les joueurs adultes, les contraintes articulaires excessives générées lors du service et répétées de nombreuses fois au cours d'un entraînement ou d'un match, et par extension au cours d'une saison sportive ou d'une carrière, peuvent être mises en cause dans l'apparition des blessures chroniques du membre supérieur. À l'heure actuelle, aucune étude ne s'est proposée de mesurer les contraintes articulaires du membre supérieur lors du service des jeunes joueurs de tennis. Ces données ont par exemple été investiguées pour le lancer au baseball chez les garçons, avec des résultats montrant des valeurs maximales de contraintes qui augmentent modérément entre 9 et 12 ans puis beaucoup plus fortement de 13 ans jusqu'à l'âge adulte (Fleisig et al., 1999, 2018). **Une connaissance des contraintes subies au niveau du membre supérieur est essentielle pour mieux comprendre le risque traumatique lié à l'exécution du service en fonction de l'âge et du sexe, et cette question sera abordée dans l'étude 1 de ce travail.** Pour identifier plus précisément l'influence des niveaux de contraintes sur le risque de survenue d'une pathologie chronique, Bahr et Krosshaug (2005) ont suggéré de coupler l'analyse en laboratoire avec un enregistrement épidémiologique des blessures du

sportif. En accord avec ces recommandations, nous utiliserons dans cette thèse un questionnaire pour enregistrer les blessures des jeunes joueurs et des jeunes joueuses.

2.3.3.3.4 Le niveau technique et les facteurs pathomécaniques

L'augmentation des contraintes du membre supérieur au service serait principalement liée à l'augmentation de la vitesse de balle (Elliott et al., 2003; Reid et al., 2008). Dans la mesure où la vitesse du service augmente avec le niveau de jeu (Girard et al., 2005; Martin et al., 2014), les joueurs élités sont théoriquement soumis à des contraintes articulaires plus élevées et donc à un risque de blessures chroniques plus important par rapport aux joueurs de plus faible niveau. Martin et al. (2014) ont pourtant rapporté une vitesse de balle supérieure et des contraintes articulaires inférieures pour des joueurs professionnels par rapport à des joueurs de niveau régional. Ces résultats amènent à penser que les joueurs professionnels utilisent une technique de service plus « juste » que les joueurs amateurs, c'est-à-dire une technique plus performante et moins traumatisante (Schönborn, 2002). Une meilleure compréhension des éléments techniques qui modifient le niveau de contraintes articulaires lors d'un geste sportif est essentielle pour améliorer la prévention des blessures (van den Bogert, 1994). En biomécanique, un élément technique qui augmente significativement les valeurs de contraintes articulaires sans effet sur la performance est décrit comme un facteur pathomécanique (Fortenbaugh et al., 2009; Martin, Kulpa, Ropars et al., 2013). Par exemple, Elliott et al. (2003) ont montré qu'une poussée des jambes « inefficace » n'a aucune influence sur la vitesse du service mais conduit à une augmentation des pics de moments de varus au coude, de flexion du coude et de rotation interne de l'épaule pour des joueurs professionnels. Pour Reid et al. (2008), ce défaut technique aboutit à l'inverse à une diminution de la vitesse de la raquette sans augmentation des contraintes à l'épaule. Néanmoins, ces deux résultats sont discutables puisque l'efficacité de la poussée des jambes a été objectivée par la flexion des genoux au début de la poussée des jambes (flexion maximale) (Reid et al., 2008) ou au moment de la RME de l'épaule (phase d'extension des membres inférieurs) (Elliott et al., 2003). La vitesse verticale maximale des hanches est sans doute un critère plus pertinent pour décrire la qualité de la poussée des jambes (Whiteside et al., 2013). De leur côté, Martin, Kulpa, Ropars et al. (2013) ont identifié un facteur pathomécanique du service en relation avec un mauvais timing au niveau des rotations du tronc. Tandis que l'enchaînement logique voudrait que la vitesse maximale de rotation longitudinale des hanches précède celle des épaules, une inversion de cette séquence a été mise en évidence pour des joueurs adultes qui ont subi une blessure chronique sur le membre supérieur durant l'étude. Cette inversion diminue le transfert d'énergie entre le tronc et la raquette, ce qui impliquerait une plus grande sollicitation du membre supérieur lors de l'accélération de la raquette. Par ailleurs, l'hyperangulation de l'épaule lors des mouvements de lancer ou du service correspond au retard de l'adduction horizontale par rapport à la rotation externe de l'épaule pendant la phase d'armé (Figure 2.26) (Martin, Kulpa, Ropars et al., 2013; Whiteley, 2007). Lorsque l'épaule est placée en rotation externe, l'abduction horizontale excessive de l'épaule peut provoquer des conflits postéro-supérieurs aboutissant à des lésions de la coiffe des rotateurs (Cools et al., 2008). Au service, ce phénomène d'hyperangulation a été mis en relation avec une diminution de la vitesse de balle et une augmentation des contraintes à l'épaule lors du service de joueurs adultes (Martin, Kulpa, Ropars et al., 2013).



Figure 2.26 – Phénomène d’hyperangulation de l’épaule, avec un léger retard du bras sur le tronc lors de la phase d’armé, d’après Martin (2013).

En ce qui concerne les facteurs pathomécaniques du service en lien avec le risque de blessures au niveau du tronc, les données disponibles dans la littérature sont relativement limitées. Deux études de cas ont néanmoins suggéré un lien entre une technique de service perfectible et un risque de blessures aux abdominaux. Ainsi, l’analyse biomécanique du service d’un joueur professionnel réalisée après une blessure aux abdominaux a permis de mettre en relief une poussée des jambes moins performante par rapport à cinq autres joueurs d’un groupe témoin, notamment en ce qui concerne la vitesse maximale d’extension des chevilles ($-200\text{ }^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$ pour la cheville arrière, $-400\text{ }^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$ pour la cheville avant) (Tubez et al., 2015). Puisqu’ils constituent le maillon entre les membres inférieurs et les membres supérieurs, les muscles abdominaux jouent un rôle essentiel dans la transmission d’énergie mécanique entre le bas du corps et le haut du corps (Maquirriain et al., 2007). Pour transférer l’énergie suffisante à l’épaule puis à la raquette, Tubez et al. (2015) ont émis l’hypothèse qu’une mauvaise poussée des jambes doit être compensée par une sollicitation plus importante des muscles abdominaux, ce qui explique vraisemblablement l’origine de la blessure du joueur. De leur côté, Natsis et al. (2012) ont fait référence à une joueuse professionnelle également blessée aux abdominaux à la suite d’un service et sujette à de multiples récives. Après avoir décrit plusieurs protocoles de soins, ils ont souligné que la joueuse n’a plus fait de récive à partir du moment où elle a entrepris une modification technique de son service, malheureusement sans préciser la nature exacte de cette modification. En ce qui concerne les facteurs pathomécaniques du dos, deux études ont mise en relation une extension prononcée du tronc et une augmentation des contraintes articulaires lombaires au cours de la phase d’armé du service (Abrams et al., 2014; Campbell et al., 2013). D’ailleurs, ce facteur pathomécanique est le seul à avoir été identifié pour le service de jeunes joueurs élités (13 à 17 ans) (Campbell et al., 2013). Pourtant, une connaissance plus précise de ces facteurs pathomécaniques permettrait de fournir aux entraîneurs des recommandations techniques spécifiques pour améliorer la prévention des blessures chroniques chez les jeunes joueurs. En effet, le service est un coup extrêmement complexe qui implique un processus d’apprentissage long et très progressif (Whiteside et al., 2013). Avant de maîtriser une technique de service efficace, il est possible que les jeunes joueurs utilisent une technique perfectible qui augmente le niveau de contraintes articulaires, ce qui les exposerait à court terme à des risques plus importants de pathologies chroniques (Anz et al., 2010; Campbell et al., 2013; Martin, Kulpa, Ropars et al., 2013). Aussi, à moyen ou long terme, certaines blessures chroniques observées à la fin de l’adolescence ou à l’âge adulte pourraient s’expliquer par l’utilisation répétée et prolongée d’une mauvaise technique gestuelle au cours de la formation (Andrews et Fleisig, 1998). Pour l’heure, de nombreux facteurs pathomécaniques restent à l’état de supposition chez les jeunes joueurs car ils renvoient à ceux identifiés chez les adultes ou aux hypothèses « de terrain » formulées par les entraîneurs. Par exemple, une mauvaise poussée des jambes constituerait chez les adultes une erreur technique de service qui augmenterait le risque

d'apparition de blessures à l'épaule et aux abdominaux (Elliott et al., 2003; Tubez et al., 2015). Ces conséquences sont aussi envisagées chez les jeunes joueurs même si aucune étude biomécanique ne s'est intéressée précisément à cette problématique. Pourtant, les entraîneurs remarquent souvent un manque d'explosivité de la poussée des jambes chez les jeunes joueurs, résultat probable d'un déficit de force au niveau des membres inférieurs, surtout chez les filles (Genevois, 2014; Whiteside et al., 2013). La technique d'appuis pourrait également être un facteur explicatif puisque certains entraîneurs considèrent que le SRA ne permet pas de produire une poussée des jambes aussi explosive que le RA (Genevois, 2014; Renoult, 2007). Au regard des éléments énoncés précédemment, la relation entre la technique d'appuis au service, la qualité de la poussée des jambes et le risque de blessures chroniques des jeunes joueurs apparaît comme une problématique essentielle pour un entraîneur. **L'étude 2 de ce travail aura pour ambition d'éclaircir cette relation en s'intéressant aux conséquences biomécaniques du service RA et du service SRA sur le risque de blessures chroniques du tronc et du membre supérieur.** De plus, le service MRA correspond à une modification technique du service RA souvent observée chez les jeunes joueurs (Renoult, 2007). Ellenbecker (2006) a émis l'hypothèse que cette technique d'appuis conduit à une diminution de la poussée des jambes et à un dévissage précoce des hanches et des épaules, augmentant par conséquent les sollicitations aux abdominaux et à l'épaule au cours du service. **L'étude 2 s'intéressera tout particulièrement au service MRA dans le but de fournir des éléments objectifs concernant l'influence de ce type d'appuis sur le risque de blessures des jeunes joueurs.** Enfin, le service en plateau est une technique de service qui fait l'objet d'une différence de traitement tout à fait surprenante entre les entraîneurs et les scientifiques. Il correspond à l'ouverture du tamis de la raquette vers le ciel au départ de la boucle (accélération de la raquette vers le bas) (Figure 2.27) (Smith, 2004; Williams et Petersen, 2000). Nous avons été amenés à nous interroger sur cette technique de service suite à de nombreux échanges avec des entraîneurs en marge de ce travail de thèse. En effet, pour la grande majorité d'entre eux, le service en plateau est une erreur technique qui doit être corrigée car elle serait responsable d'une diminution de la performance et d'une éventuelle augmentation du risque de blessures à l'épaule ou au coude. Pourtant, à notre connaissance, cette technique de service n'a jamais été abordée dans la littérature scientifique. **Nous aborderons le service en plateau dans l'étude 3 de ce travail, afin de déterminer si cet élément technique est un facteur pathomécanique du service chez les jeunes joueurs.**



Figure 2.27 – Service en plateau (à gauche) avec un tamis orienté vers le ciel au départ de la boucle par rapport à un service plus « conventionnel » (à droite).

Chapitre 3

Synthèse et objectifs

Ce travail de thèse porte sur l'analyse biomécanique du service des jeunes joueurs et des jeunes joueuses élites. Plus précisément, la problématique centrale de ce travail consiste à répondre aux deux questions suivantes : comment évolue la technique de service depuis les premières années de formation jusqu'à l'âge adulte chez les garçons et chez les filles ? Et quels sont les critères de performance et les facteurs de risques de blessures au service chez les jeunes joueurs et les jeunes joueuses élites ? Les réponses à ces questions constitueront une aide à l'entraînement dans la construction d'une technique de service la plus performante et la moins traumatisante possible tout au long de la formation des jeunes joueurs élites.

Notre revue de littérature a permis de mettre en évidence l'importance de l'optimisation du geste du service dans le processus de formation des meilleurs espoirs. Dès l'âge de 11 ans, un service performant se caractérise par une vitesse de balle élevée et constitue une arme essentielle pour faire partie des meilleurs de sa catégorie d'âge. L'augmentation de la vitesse du service est d'ailleurs un objectif poursuivi tout au long de la formation dans la mesure où cet aspect de la performance conditionne ensuite très largement le succès des joueurs et des joueuses professionnels. Toutefois, le geste du service est aussi mis en cause dans les mécanismes de blessures chroniques au niveau du tronc et du membre supérieur. Entre 11 et 18 ans, ces blessures sont nombreuses et problématiques car elles limitent la performance, freinent la progression et causent parfois l'arrêt prématuré d'une carrière. La technique gestuelle, qui se construit progressivement au cours de l'apprentissage et des entraînements, joue un rôle déterminant dans l'efficacité du service. Par conséquent, l'analyse biomécanique a été placée au cœur de ce travail de thèse car elle constitue un outil précieux pour comprendre le mouvement et identifier les éléments techniques en lien avec la performance et le risque de blessures articulaires chroniques. Alors que de nombreuses études biomécaniques se sont intéressées à la technique de service des joueurs adultes, plusieurs questions restent en suspens pour les jeunes joueurs et les jeunes joueuses. Notre travail ambitionne de lever une partie de ces interrogations, avec l'idée sous-jacente de fournir aux entraîneurs des recommandations spécifiques quant à l'enseignement technique du service chez les jeunes joueurs.

Ainsi, l'étude 1 de ce travail fera l'objet d'une comparaison des variables cinématiques et des variables dynamiques du service en fonction des catégories d'âge (U14, U16 et +16) et du sexe. L'objectif sera d'analyser l'évolution de la biomécanique du service pour des joueurs élites entre 12 ans et l'âge adulte, de déterminer les principales différences techniques entre le service masculin et le service féminin, d'extraire les déterminants mécaniques responsables de la performance et d'évaluer le risque de blessures chroniques sur le membre supérieur.

Ensuite, nous explorerons dans l'étude 2 les avantages et les inconvénients biomécaniques des deux techniques d'appuis les plus utilisées au service, le RA et le SRA. Des variables cinématiques, des variables dynamiques et des données épidémiologiques seront comparées dans le but d'objectiver la technique d'appui la plus efficace et la moins traumatisante pour les jeunes joueurs. Une attention particulière sera également portée sur une erreur technique fréquente dans la réalisation du RA, le MRA, dont les répercussions sur la performance et sur le risque de blessures restent à l'état de supposition.

Enfin, dans la dernière étude de ce travail, nous nous attacherons à déterminer si l'ouverture de la raquette au moment de la boucle (le service en plateau) peut être considérée comme un facteur pathomécanique du service des jeunes joueurs. Nous discuterons les éventuels risques de blessure associés à cette technique de service. De plus, afin d'envisager des correctifs techniques pour les entraîneurs, nous chercherons à préciser les paramètres cinématiques qui expliquent son apparition.

Chapitre 4

Méthodologie générale

4.1 Déroutement

La phase d'expérimentation s'est déroulée sur une période de 3 ans, de juin 2015 à mai 2018. Toutes les expérimentations ont eu lieu sur un terrain de tennis situé à l'intérieur de la plateforme Immermove du laboratoire Mouvement, Sport, Santé (M2S) de l'Université de Rennes 2 (Bruz, France). Les participants inclus dans ce travail de thèse ont été recrutés de trois façons différentes (Tableau 4.1) :

- un partenariat signé entre la Fédération Française de Tennis (FFT) et le laboratoire M2S concernant le suivi des meilleurs joueurs et joueuses Français âgés de 12 à 18 ans. Durant les 3 années du partenariat, 22 garçons et 19 filles ont intégré le protocole expérimental de notre étude. Sur cette même période, 9 joueurs et 4 joueuses âgés de plus de 18 ans et suivis par la FFT au Centre National d'Entraînement (CNE) ont également été recrutés.
- une action spécifique concernant l'optimisation du service a été menée avec la Ligue de Bretagne de Tennis (LBT) à destination des meilleures jeunes joueuses de la région (13 à 19 ans, n = 11).
- 6 joueurs et 3 joueuses de niveau national ou international (14 à 27 ans) ont sollicité le laboratoire M2S dans le cadre d'une démarche privée afin d'optimiser leur performance au service.

Tous les participants ont bénéficié d'une analyse biomécanique de leur service. Chacune de ces analyses a donné lieu à la rédaction d'un compte-rendu écrit, dont un exemple est présenté en annexe de ce travail (Annexe 1). Afin de bénéficier d'une évaluation objective de leur progression au service, 8 joueurs et 5 joueuses ont réalisé une deuxième analyse biomécanique et 5 joueurs ont réalisé une troisième analyse biomécanique (un an d'intervalle en moyenne entre chaque analyse). Au total, 92 analyses biomécaniques ont été réalisées durant la phase d'expérimentation (Tableau 4.1). Pour les joueurs et les joueuses qui ont bénéficié de deux ou trois analyses biomécaniques, seuls les résultats de la première analyse ont été utilisés dans le cadre de ce travail de thèse (Tableau 4.1).

	Garçons	Filles	Total
Nombre total de participants	37	37	74
Fédération Française de Tennis	31	23	54
Ligue de Bretagne de Tennis	0	11	11
Démarche individuelle	6	3	9
Analyse supplémentaire	13	5	18
2 ^{ème} analyse	8	5	13
3 ^{ème} analyse	5	0	5
Nombre total d'analyses biomécaniques	50	42	92

Tableau 4.1 – Récapitulatif des analyses biomécaniques réalisées au cours de ce travail de thèse.

4.2 Participants

Au total, 37 joueurs âgés de 12 à 26 ans (âge : $16,1 \pm 3,7$ ans, taille : $1,77 \pm 0,10$ m, masse : $63,7 \pm 10,8$ kg) et 37 joueuses âgées de 12 à 27 ans (âge : $16,0 \pm 2,9$ ans, taille : $1,69 \pm 0,07$ m, masse : $57,1 \pm 5,9$ kg) ont participé aux expérimentations. Tous les sujets étaient considérés comme ayant un niveau de jeu élite, avec un classement FFT en 2^{ème} série ou en 1^{ère} série française (de 15 à N°1). Plus d'une vingtaine de joueurs et de joueuses de notre population d'étude avaient obtenu au moins un titre de champion de France chez les jeunes avant leur venue au laboratoire. Une présentation détaillée des caractéristiques individuelles de chaque joueur et de chaque joueuse est fournie en annexe de ce travail (Annexes 2 et 3). Avant l'expérimentation, chaque sujet a été informé oralement du protocole mis en place. Un consentement écrit a été obtenu pour chacun d'entre eux, celui-ci provenant du représentant légal lorsque le sujet était mineur. Tous les joueurs et les joueuses étaient en bonne santé au moment de l'expérimentation et en capacité de servir au maximum de leurs possibilités. De plus, aucun sujet de notre population n'avait subi par le passé d'intervention chirurgicale au niveau du bras dominant ou du tronc.

4.3 Capture de mouvement en 3D

Les sujets et leur raquette ont été équipés de 43 marqueurs corporels réfléchissants (16 mm de diamètre). Un modèle mathématique comprenant 15 segments corporels a été utilisé (tête, tronc, bras, avant-bras, mains, cuisses, jambes, pieds, raquette). En accord avec la littérature, 38 marqueurs ont été positionnés sur des repères anatomiques précis pour calculer la position des centres articulaires du sujet. De plus, 5 marqueurs dissymétriques ont été placés pour simplifier la reconnaissance des côtés droit et gauche du corps du sujet et ainsi faciliter la reconstruction des essais (Tableau 4.2 et Figure 4.1) (Leardini et al., 1999; Reed et al., 1999; Zatsiorsky et al., 1990). Pour minimiser les erreurs liées aux mouvements des vêtements, les joueurs portaient seulement un short de tennis, des chaussures de tennis et un bandeau, et les joueuses portaient en plus une brassière de sport. Cinq marqueurs additionnels ont été positionnés sur l'extrémité du manche de la raquette, sur le cœur de la raquette, sur la tête de la

raquette et sur les côtés gauche et droit du tamis de la raquette (Figure 4.1) (Martin et al., 2014; Martin, Kulpa, Ropars et al., 2013).

	Repères anatomiques
Marqueurs	
RFHD, LFHD	Os frontal côtés droit et gauche
RBHD, LBHD	Os occipital côtés droit et gauche
C7	Processus épineux de la 7 ^{ème} vertèbre cervicale
T10	Processus épineux de la 10 ^{ème} vertèbre thoracique
CLAV	Incisure jugulaire du sternum
STRN	Processus xyphoïde
RBAC	Marqueur dissymétrique de la scapula droite
RSHO, LSHO	Acromions droit et gauche
RUPA, LUPA	Marqueurs dissymétriques sur le bras droit et gauche
RHUM, LHUM	Épicondyles médiaux de l'humérus
RRAD, LRAD	Têtes des radius droit et gauche
RWRA, LWRA	Processus styloïdes radiaux droit et gauche
RWRB, LWRB	Processus styloïdes ulnaires droit et gauche
RCAR, LCAR	3 ^{ème} processus métacarpien des mains droite et gauche
RFWT, LFWT	Épines iliaques antéro-supérieures droite et gauche
RBWT, LBWT	Épines iliaques postéro-supérieures droite et gauche
RKNE, LKNE	Condyles latéraux fémoraux droit et gauche
RKNI, LKNI	Condyles médiaux fémoraux droit et gauche
RTHI, LTHI	Marqueurs dissymétriques sur la cuisse droite et gauche
RANE, LANE	Malléoles externes droite et gauche
RANI, LANI	Malléoles internes droite et gauche
RHEE, LHEE	Tubérosités postérieures des calcaneus droit et gauche
RTOE, LTOE	Têtes des gros orteils droit et gauche
RTAR, LTAR	Pliures des pieds droit et gauche

Tableau 4.2 – Repères anatomiques pour le placement des marqueurs sur le corps du sujet.

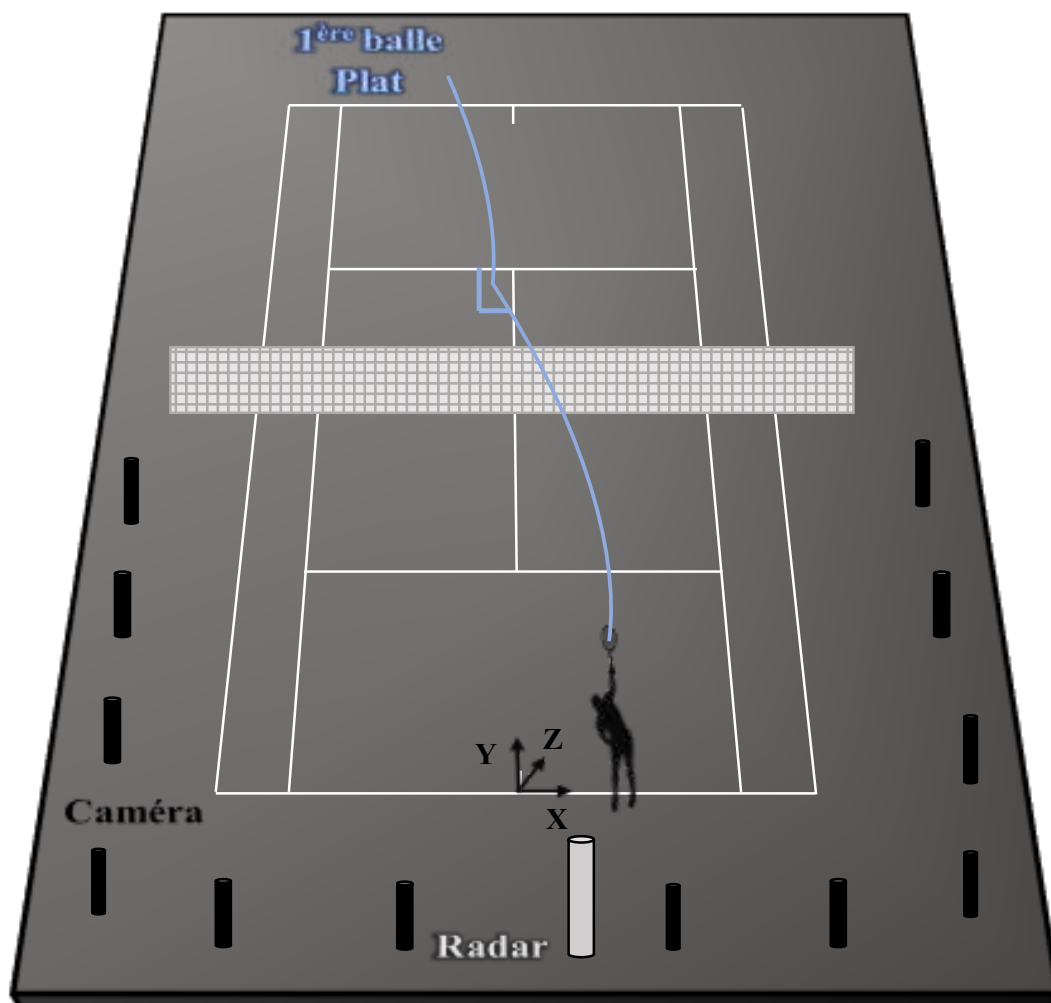


Figure 4.2 – Représentation schématique du protocole de l'étude pour un joueur droitier (les caméras placées sur la coursière n'ont pas été représentées).

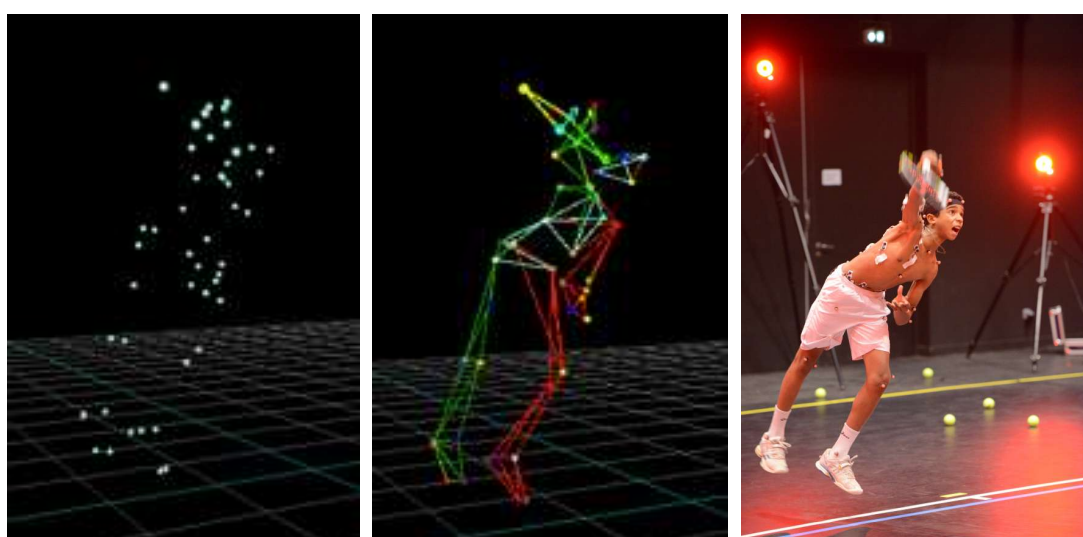


Figure 4.3 – Reconstruction de la position 3D (à gauche) et labellisation (au centre) des marqueurs au cours du service. La figure de droite représente le joueur au service au même instant.

4.4 Protocole expérimental

Chaque participant a réalisé un échauffement général de 10 minutes, suivi d'un échauffement spécifique au service d'au moins 5 minutes comprenant le nombre de répétitions nécessaires pour s'habituer à la situation expérimentale. Afin de s'assurer de la qualité des mouvements capturés et du confort des joueurs et des joueuses face à la situation expérimentale, chacun d'entre eux a réalisé l'expérimentation avec sa raquette personnelle (Martin et al., 2014; Rogowski et al., 2011; Whiteside et al., 2013). Les sujets droitiers ont été invités à servir dans la diagonale des égalités vers une zone de 1,5 x 1,0 m délimitée dans le carré de service le long de la ligne médiane (zone du T) (Figure 4.2 et Figure 4.4). Les joueurs gauchers et les joueuses gauchères ont réalisé l'expérimentation dans l'autre carré de service (zone du T dans la diagonale des avantages). Chaque participant devait réussir 5 services à plat en 1^{ère} balle dans la zone prédéfinie. La consigne était de réaliser ces services de la même manière qu'en situation de match, avec la recherche d'un maximum de vitesse (sans effet). Pour être comptabilisé dans les 5 essais retenus pour l'analyse biomécanique, le service devait atteindre la zone délimitée mais aussi être validé par les expérimentateurs au vu des consignes énoncées précédemment. Ce protocole est en accord avec les recommandations de Mullineaux et al. (2001) qui estiment que l'analyse d'au moins 3 services est nécessaire pour obtenir une représentation précise du mouvement du service.



Figure 4.4 – Joueuse au service au cours de l'expérimentation.

4.5 Vitesse de balle

La vitesse de balle de chaque service a été mesurée grâce à un radar (Stalker Professional Sports Radar, Applied Concepts, Plano, Texas, USA ; précision : $\pm 1,6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, fréquence : 34,7 GHz, temps d'acquisition : 0,01 s) fixé sur un trépied et placé 2 mètres derrière le joueur (Figure 4.2). La hauteur du radar sur le trépied a été ajustée en fonction de la taille de chaque sujet.

4.6 Analyse cinématique

Le mouvement du service a été divisé en plusieurs phases afin de faciliter l'interprétation des données ainsi que la discussion de ce travail (phase de préparation, phase d'armé, phase d'accélération, phase de décélération et phase d'accompagnement) (Bahamonde, 2000; Kovacs et Ellenbecker, 2011; Martin et al., 2014). La Figure 4.5 illustre une partie des variables cinématiques mesurées au cours de la phase d'armé et de la phase d'accélération du service. L'angle de séparation représente la différence entre la rotation longitudinale des hanches et la rotation longitudinale des épaules durant le service (Figure 4.5A) (Reid et al., 2015; Whiteside et al., 2013). L'inclinaison latérale maximale du tronc a été mesurée de la même manière que dans les travaux de Whiteside et al. (2013), c'est-à-dire en utilisant l'angle maximal entre la ligne des épaules et l'axe horizontal lors de la phase d'armé (Figure 4.5B). Afin d'analyser la descente de la raquette dans le dos, l'angle formé par l'axe transverse de la raquette par rapport à l'axe horizontal a été mesuré au moment où l'axe longitudinal de la raquette était parallèle au sol (à l'axe horizontal) (Figure 4.5C). L'impact de balle a été déterminé visuellement sur les reconstructions 3D du service, puis vérifié par l'analyse de la décélération de la tête de raquette (l'accélération horizontale de la raquette décroît de façon abrupte lors du contact balle – raquette) (Wagner et al., 2014). En accord avec la littérature, la position du premier métatarse du pied avant au moment de la flexion maximale du genou avant (Figure 4.5B) a servi de point de référence pour déterminer la position de l'impact de balle (Figure 4.5E et 4.6F) (Chow et al., 2003; Reid et al., 2010; Whiteside et al., 2013). La vitesse verticale maximale des hanches a été mesurée au moment de l'extension des membres inférieurs car elle constitue un très bon indicateur de l'explosivité de la poussée des jambes au service (Whiteside et al., 2013). Les vitesses angulaires maximales de rotation interne de l'épaule, de flexion du poignet, d'extension du coude, de rotation du tronc autour des 3 axes (longitudinal, transversal et sagittal), d'extension des genoux et d'extension des chevilles ont été calculées. Ces rotations segmentaires sont considérées dans la littérature comme des actions essentielles dans la réalisation du mouvement du service chez des joueurs et des joueuses élites (Fleisig et al., 2003; Gordon et Dapena, 2006; Tubez et al., 2015; Wagner et al., 2014; Whiteside et al., 2013). Enfin, les variables temporelles sont exprimées en fonction du mouvement de service normalisé, celui-ci étant défini entre le lancer de balle (0 %) et l'impact de balle (100 %).

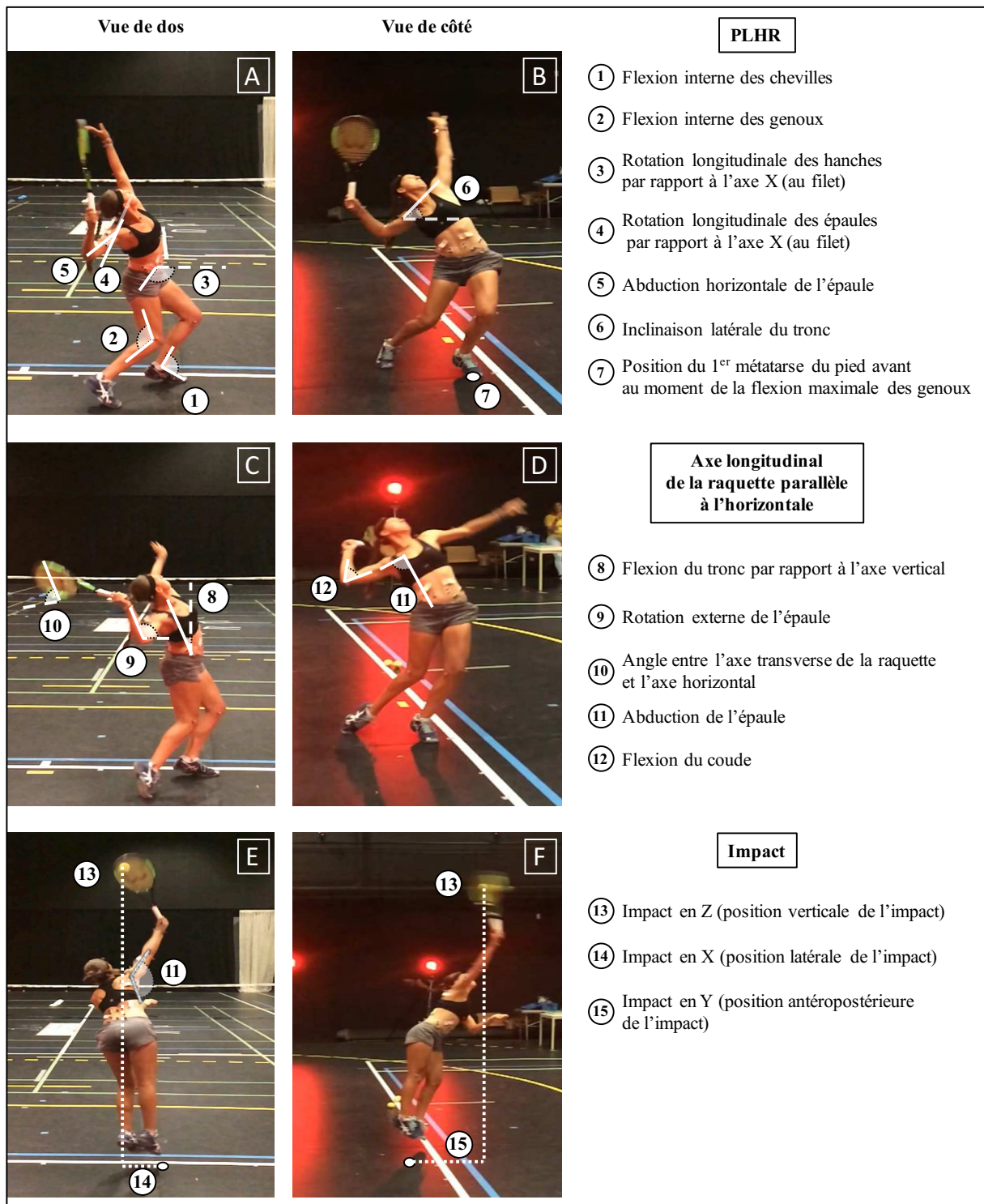


Figure 4.5 – Variables cinématiques mesurées au cours du service. PLHR : point le plus haut de la raquette lors de l'armé.

4.7 Analyse dynamique

Une approche « top-down » de la dynamique inverse a été utilisée pour calculer les contraintes articulaires à l'épaule, au coude et au poignet. Le bras dominant a été modélisé comme une chaîne cinématique simple composée du segment raquette-main, du segment

avant-bras et du segment bras. Pour chaque participant, la masse, le centre de masse (équilibre) et le modèle de la raquette ont été relevés. Le moment d'inertie de la raquette autour de son axe transverse a été calculé en utilisant le théorème de l'axe parallèle et la valeur du « swingweight » fournie par les fabricants (Elliott et al., 2003; Martin et al., 2014; United States Racquet Stringers Association, 2016). Les moments d'inertie de la raquette autour de son axe longitudinal et de son axe normal ont ensuite été estimés grâce aux équations de Brody (1985). Les masses et les moments d'inertie des 3 segments utilisés pour résoudre les équations de la dynamique inverse ont été obtenus grâce aux tables anthropométriques de De Leva (1996). Les forces et les moments de forces articulaires ont d'abord été calculés dans le repère global, puis ont été transformés dans les repères orthogonaux locaux propres à chaque articulation. Quatorze valeurs maximales de contraintes articulaires identifiées dans la littérature comme des indicateurs du risque de blessures chroniques lors des mouvements de service ou de lancer ont été déterminées (Figure 4.6) (Elliott et al., 2003; Fleisig et al., 1995; Martin et al., 2014). Dans la mesure où notre population d'étude est composée de joueurs et de joueuses de taille et de masse très différentes (Annexes 2 et 3), les pics de contraintes articulaires ont été normalisés pour faciliter la comparaison entre les groupes. Les forces articulaires ont ainsi été divisées par la masse du sujet, et les moments de forces articulaires ont été divisés par le produit de la masse et de la taille du sujet, puis multipliés par 100 (Campbell et al., 2014; Chu et al., 2009; Davis et al., 2009; Elliott et al., 2003; Martin et al., 2014).

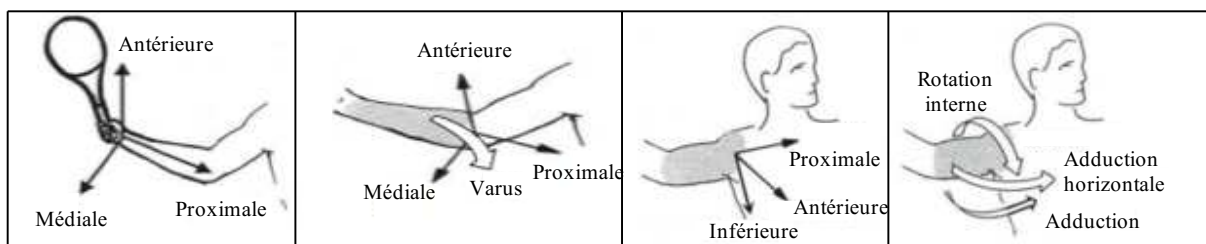


Figure 4.6 – Représentation des forces (flèches noires) et des moments de forces (flèches blanches) calculés au poignet, au coude et à l'épaule.

4.8 Recueil des données sur les blessures

Avant le début de l'analyse biomécanique, chaque participant a été invité à remplir un questionnaire écrit concernant son historique de blessures. Ce questionnaire a permis d'une part de s'assurer que le joueur ou la joueuse n'avait aucune douleur l'empêchant d'être à 100 % au moment du test de service, et d'autre part de répertorier toutes les blessures ou douleurs subies au cours de l'année précédant la capture de mouvement et en lien avec la pratique du tennis. Plus précisément, il était demandé de préciser le nom, le type (chronique ou traumatique), la localisation (segment ou articulation), la gravité (nombre de jours d'arrêt) et les coups du tennis affectés pour chacune des blessures. Chaque participant a reçu des informations concernant la manière dont les blessures devaient être rapportées dans le questionnaire.

Chapitre 5

Étude 1 : Influence de l'âge et du sexe sur les paramètres cinématiques et dynamiques du service de jeunes joueurs et joueuses élites

5.1 Introduction

Le service est considéré comme le coup le plus important du jeu, fournissant au joueur un avantage tactique considérable pour prendre l'ascendant sur l'adversaire ou pour gagner le point immédiatement (Cahill, 2002; Gillet et al., 2009; Hizan et al., 2015). Dans cette logique, la vitesse de balle joue un rôle essentiel sur la performance au service et plus globalement sur le succès des joueurs de haut niveau (Cross et Pollard, 2009; Whiteside et Reid, 2017). Bien qu'étant le seul coup du tennis sous le contrôle total du joueur, le service est aussi un mouvement excessivement complexe à réaliser (Whiteside et al., 2013). De nombreuses études scientifiques se sont intéressées aux actions des membres inférieurs (Elliott et Wood, 1983; Girard et al., 2007; Reid et al., 2008), du tronc (Bahamonde, 2000; Chow et al., 2009; Martin, Kulpa, Delamarche et Bideau, 2013) et du membre supérieur (Elliott et al., 1995; Reid, Elliott et Alderson, 2007; Tanabe et Ito, 2007) dans le but d'éclaircir la relation entre la technique gestuelle et la vitesse de balle. Ces études se sont essentiellement focalisées sur le service des joueurs adultes. Par conséquent, plusieurs incertitudes subsistent concernant le service féminin et celui des jeunes joueurs et des jeunes joueuses.

Chez les jeunes joueurs, l'optimisation du service s'envisage bien souvent à la lumière du modèle technique que représente le service des joueurs adultes (Schönborn, 2002). Ce type d'approche semble inapproprié au regard des différences anthropométriques ou physiologiques rapportées en fonction de l'âge et du sexe (Handelsman, 2017; Pluim, 1999; Ulbricht et al., 2016). À notre connaissance, une seule étude s'est proposée d'explorer l'influence de l'âge sur l'évolution biomécanique du service. Les principales différences techniques observées entre des joueuses U12 et U16 se résument à une meilleure utilisation du bras et de l'avant-bras pour les joueuses plus âgées, ce qui aboutit à une vitesse de raquette plus élevée à l'impact. Cette vitesse augmente ensuite moins fortement jusqu'à l'âge adulte, et la progression des joueuses U16 passe essentiellement par une optimisation de l'action des jambes et de la rotation antéropostérieure du tronc (Whiteside et al., 2013).

Malgré plusieurs similitudes techniques avec le service masculin, le service féminin se caractérise par une vitesse de balle moins élevée (Ulbricht et al., 2016; Vaverka et Cernosek, 2013). Pour les joueuses professionnelles, ce déficit de vitesse est majoritairement attribué à une action de rotation interne de l'épaule moins explosive juste avant l'impact de balle (Fleisig et al., 2003). Pour l'heure, les critères techniques qui distinguent le service féminin du service masculin se basent sur les connaissances empiriques des entraîneurs.

Par ailleurs, le service des joueurs élites implique une action extrêmement violente du membre supérieur par rapport aux autres coups du tennis (Bylak et Hutchinson, 1998; Kibler et Safran, 2005). De précédents travaux ont rapporté des valeurs de contraintes articulaires élevées

au niveau de l'épaule, du coude et du poignet lors du service des joueurs adultes (Elliott et al., 2003; Martin et al., 2014; Reid, Elliott et Alderson, 2007). Le niveau de contraintes articulaires subies par les jeunes joueurs au cours du service n'a en revanche jamais été abordé dans la littérature scientifique. La connaissance de ces contraintes articulaires s'avère fondamentale pour mieux comprendre le risque traumatique lié à l'exécution du service et par la suite améliorer les stratégies de prévention des blessures.

Par conséquent, cette étude fera l'objet d'une comparaison des variables cinématiques et des contraintes articulaires maximales au cours de la 1^{ère} balle de service en fonction des catégories d'âge (U14, U16, +16) et du sexe des joueurs. Les objectifs sont les suivants : (a) analyser l'évolution de la biomécanique du service des joueurs et des joueuses élites entre 12 ans et l'âge adulte ; (b) objectiver les principales différences entre le service masculin et le service féminin ; (c) identifier les éléments techniques qui influencent la vitesse de balle ; (d) évaluer le risque de blessures chroniques du membre supérieur en fonction des catégories d'âge. Concrètement, cette étude ambitionne de fournir aux entraîneurs des recommandations techniques spécifiques afin d'individualiser plus efficacement les contenus d'entraînement des jeunes joueurs et des jeunes joueuses élites. Enfin, nous présenterons des résultats préliminaires concernant l'analyse électromyographique (EMG) de 16 muscles du tronc et du membre supérieur lors du 1^{er} service, ainsi que des résultats préliminaires sur les variables cinématiques et dynamiques mesurées lors de la 2^{nde} balle de service.

5.2 Méthodologie

5.2.1 Participants

Afin de déterminer l'influence de l'âge et du sexe sur les différentes variables mesurées au cours du service, les participants ont d'abord été répartis en deux groupes selon leur sexe (garçons [G] et filles [F]), puis ils ont été de nouveau répartis en 3 sous-groupes en fonction de leur âge chronologique : 12 et 13 ans (U14G et U14F), 14 et 15 ans (U16G et U16F), et 16 ans et plus (+16G et +16F) (Tableau 5.1 et Tableau 5.2).

	U14G (n = 15)	U16G (n = 12)	+16G (n = 10)	ANOVA		Post Hoc		
				P	Effect size	U14G vs U16G	U14G vs +16G	U16G vs +16G
Caractéristiques des joueurs								
Age (ans)	13,4 ± 0,6***	14,9 ± 0,7	21,5 ± 2,8	<0,001	0,917	***	***	***
Taille (m)	1,70 ± 0,07***	1,77 ± 0,08	1,87 ± 0,06	<0,001	0,704	*	***	**
Masse (kg)	54,8 ± 7,8***	64,8 ± 5,2	75,7 ± 6,4	<0,001	0,796	**	***	**
Classement FFT	5/6 à 2/6	15 à -4/6	-4/6 à N°8					
Technique d'appuis (% RA)	47	67	70					
Caractéristiques des raquettes								
Masse (kg)	0,304 ± 0,009***	0,308 ± 0,009	0,328 ± 0,010	<0,001	0,731		***	***
I _T (kg·m ²)	0,015 ± 0,002	0,015 ± 0,001	0,015 ± 0,001	0,653	0,128			
I _N (kg·m ²)	0,016 ± 0,002	0,016 ± 0,001	0,016 ± 0,001	0,693	0,121			
I _L (kg·m ²)	0,001 ± 0,000	0,001 ± 0,000	0,001 ± 0,000	0,493	0,161			
Centre de masse (m)	0,332 ± 0,009	0,330 ± 0,008	0,328 ± 0,010	0,084	0,367			

Tableau 5.1 – Caractéristiques des joueurs de l'étude 1. *** : P < 0,001, ** : P < 0,01, * : P < 0,05. La variable en gras tend à être différente (0,05 < P < 0,1). RA : relais d'appuis. I_T, I_N et I_L : moments d'inertie de la raquette autour de l'axe transverse (I_T), de l'axe normal (I_N) et de l'axe longitudinal (I_L).

	U14F (n = 7)	U16F (n = 18)	+16F (n = 12)	ANOVA		Post Hoc		
				P	Effect size	U14F vs U16F	U14F vs +16F	U16F vs +16F
Caractéristiques des joueuses								
Age (ans)	13,3 ± 0,5***	15,0 ± 0,5	19,1 ± 3,2	<0,001	0,781	***	**	***
Taille (m)	1,64 ± 0,05	1,69 ± 0,08	1,71 ± 0,04	0,081	0,373			
Masse (kg)	49,7 ± 4,9***	57,8 ± 5,3	60,3 ± 3,4	<0,001	0,636	***	***	
Classement FFT	5/6 à 0	5/6 à N°55	1/6 à N°5					
Technique d'appuis (% RA)	57	78	83					
Caractéristiques des raquettes								
Masse (kg)	0,300 ± 0,010	0,310 ± 0,012	0,309 ± 0,012	0,065	0,391			
I _T (kg·m ²)	0,014 ± 0,001	0,014 ± 0,001	0,015 ± 0,001	0,887	0,088			
I _N (kg·m ²)	0,015 ± 0,001	0,016 ± 0,001	0,016 ± 0,001	0,768	0,109			
I _L (kg·m ²)	0,001 ± 0,000	0,001 ± 0,000	0,001 ± 0,000	0,125	0,285			
Centre de masse (m)	0,333 ± 0,007	0,333 ± 0,005	0,333 ± 0,005	0,921	0,071			

Tableau 5.2 – Caractéristiques des joueuses de l'étude 1. *** : P < 0,001. Les variables en gras tendent à être différentes (0,05 < P < 0,1). RA : relais d'appuis. I_T, I_N et I_L : moments d'inertie de la raquette autour de l'axe transverse (I_T), de l'axe normal (I_N) et de l'axe longitudinal (I_L).

5.2.2 Protocole expérimental

La méthodologie concernant la capture des mouvements de service, la mesure de la vitesse de balle, l'analyse cinématique, l'analyse dynamique et l'enregistrement des blessures a été présentée dans le chapitre 4 de ce travail.

En plus de cette méthodologie, spécifiquement dans l'étude 1, nous avons exploré l'activité électrique de 8 muscles du membre supérieur dominant (biceps brachial, deltoïde antérieur, grand dentelé, grand dorsal, grand pectoral, sous-épineux, trapèze moyen et triceps brachial) et 4 muscles du tronc (côtés dominant et non-dominant : érecteur du rachis, grand droit, oblique externe et oblique interne) grâce à un système EMG sans fil (Wave Wireless EMG, Cometa, Italie, 1000 Hz). La méthodologie utilisée concernant le placement des électrodes (Annexe 4.1), les procédures d'enregistrement de la contraction maximale volontaire isométrique et le traitement des données EMG (Annexe 4.2) est en accord avec la littérature

scientifique (Chow et al., 2009; Hermens et al., 2000; Kendall et al., 2005; Seeley et al., 2008; Zipp, 1982).

Une fois le protocole de l'étude terminé (cinq 1^{er} services réussis), nous avons demandé à tous les participants de réussir cinq 2nd services slicés dans une zone de 1,5 x 1,0 m bordant l'extérieur du carré de service, puis cinq 2nd services liftés dans la zone du T (même zone que pour le 1^{er} service). La consigne donnée aux joueurs était de réaliser le 2nd service comme en situation de match, en recherchant un compromis entre vitesse de balle, quantité d'effet et réussite du service.

5.2.3 Analyses statistiques

Les valeurs moyennes et les écarts-types des différentes variables ont été calculés à partir des 5 essais réussis de chaque sujet. Pour préserver la cohérence des analyses statistiques, les résultats obtenus pour les sujets gauchers ont été inversés lorsque cela était nécessaire. En fonction de l'égalité des variances, un test ANOVA (test post-hoc de Bonferroni) ou un test de Welch (test post-hoc de Games-Howell) pour échantillons non appariés a été utilisé pour comparer les données en fonction des catégories d'âge (U14, U16 et +16) chez les garçons et chez les filles. L'analyse de l'effet du sexe a été réalisée grâce à des tests T de Student ou des tests de Mann Whitney lorsque la distribution n'était pas considérée comme normale. Pour tous ces tests, un niveau de significativité à $P < 0,05$ a été fixé. De plus, les « effect size » (taille de l'effet) ont été calculés pour renseigner l'importance des effets statistiques observés, et ont été définis comme petits ($> 0,1$), moyens ($> 0,3$) et grands ($> 0,5$) (Cohen, 1988). Des corrélations linéaires bivariées ont été réalisées grâce au test de Pearson pour étudier les relations entre la vitesse de balle et la taille des joueurs et des joueuses. Enfin, un test exact de Fisher a été utilisé pour déterminer l'influence de l'âge sur le risque de blessures des joueurs et des joueuses. Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) (Version 20; Chicago, IL, USA).

5.3 Résultats

5.3.1 Influence de l'âge chez les garçons

5.3.1.1 Caractéristiques des joueurs

La taille et la masse des joueurs augmentent de façon significative avec l'âge au sein de nos 3 groupes de garçons (Tableau 5.1). Les joueurs du groupe +16G utilisent une raquette plus lourde que les joueurs des deux autres groupes. Concernant la technique d'appuis au service, le service RA est privilégié par les joueurs des groupes U16G et +16G (respectivement 67 % et 70 %). Dans le groupe U14G, la répartition est plus équilibrée avec 7 joueurs qui utilisent le service RA (47 %) et 8 joueurs qui utilisent le service SRA (53 %) (Tableau 5.1).

5.3.1.2 Vitesse du service et position de l'impact de balle

La vitesse du 1^{er} service augmente significativement avec l'âge (U14G : $156 \pm 9 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, U16G : $168 \pm 8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, +16G : $185 \pm 9 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, $P < 0,001$ et $r = 0,798$) (Figure 5.1). Une corrélation significative existe entre la vitesse de balle et la taille des joueurs des groupes U14G et U16G ($r = 0,678$ et $P < 0,001$). La hauteur de l'impact de balle est significativement plus élevée en +16G ($2,73 \pm 0,13 \text{ m}$) par rapport aux plus jeunes joueurs ($2,53 \pm 0,10 \text{ m}$ pour les U14G, $2,62 \pm 0,13 \text{ m}$ pour les U16G, $P < 0,001$ et $r = 0,643$) (Figure 5.2). Lorsque la hauteur de l'impact est rapportée à la taille des joueurs, aucune différence significative n'est retrouvée entre les 3 groupes (1,48 fois la taille des joueurs). Avec l'âge, les joueurs ont tendance à avancer légèrement la position de l'impact de balle dans le terrain (U14G : $0,57 \pm 0,08 \text{ m}$, U16G : $0,62 \pm 0,18 \text{ m}$, +16G : $0,66 \pm 0,08 \text{ m}$, $P = 0,105$). Enfin, la position latérale de l'impact est indépendante de l'âge (pour un droitier, entre 0,16 et 0,17 m à gauche de la position du 1^{er} métatarse du pied gauche au début de la poussée) (Figure 5.2).

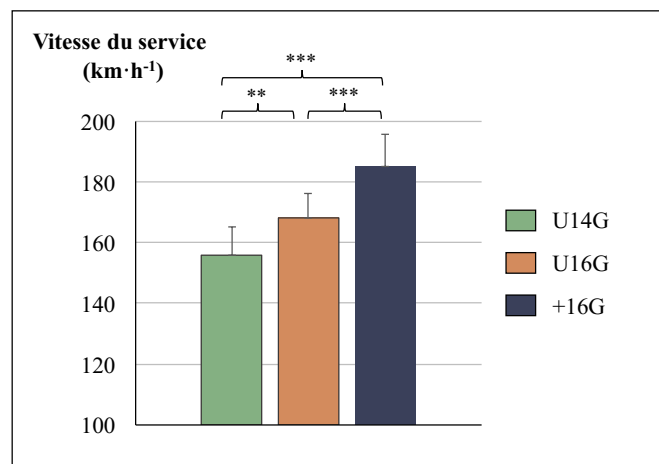


Figure 5.1 – Vitesse du 1^{er} service en fonction de l'âge des joueurs. *** : $P < 0,001$, ** : $P < 0,01$.

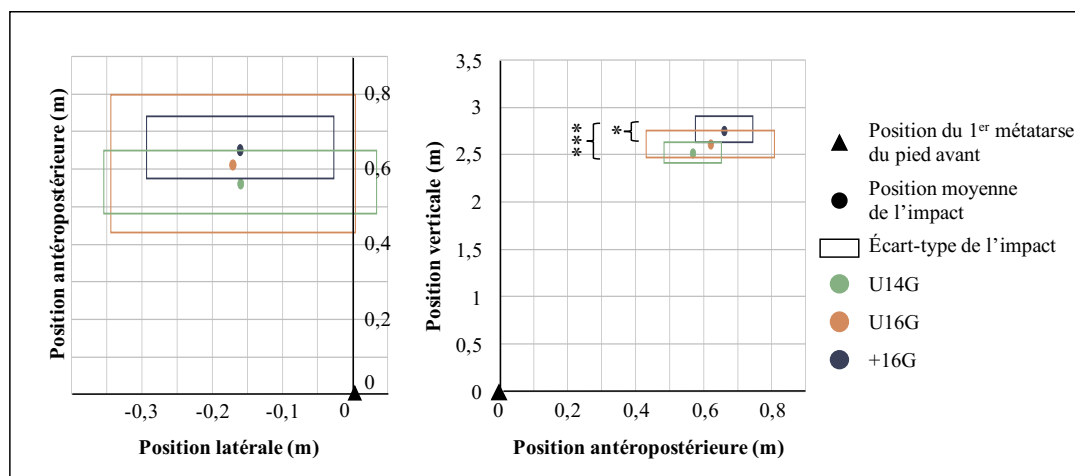


Figure 5.2 – Représentation schématique d'une vue de dessus (à gauche) et d'une vue de côté (à droite) montrant la position latérale (axe X), antéro-postérieure (axe Y) et verticale (axe Z) de l'impact du 1^{er} service en fonction de l'âge des joueurs. *** : $P < 0,001$, * : $P < 0,05$.

5.3.1.3 Variables cinématiques des membres inférieurs

Au niveau de la jambe avant, les vitesses maximales de la hanche vers le haut et d'extension du genou sont significativement supérieures en U16G et +16G par rapport au groupe U14G (Tableau 5.3). La vitesse verticale maximale de la hanche arrière tend à être inférieure pour le groupe U14G ($P = 0,078$). Les angles de flexion maximale des chevilles et des genoux, qui définissent la mise en charge des membres inférieurs avant le début de la poussée, sont identiques entre les 3 groupes. Néanmoins, la flexion du genou arrière tend à augmenter ($P = 0,081$) et celle de la cheville arrière tend à diminuer ($P = 0,061$) avec l'âge des joueurs.

	U14G (n = 15)	U16G (n = 12)	+16G (n = 10)	ANOVA		Post Hoc		
				P	Effect size	U14G vs U16G	U14G vs +16G	U16G vs +16G
Angle de flexion maximale								
Flexion cheville AR (°)	79 ± 7	85 ± 9	87 ± 9	0,061	0,388			
Flexion cheville AV (°)	77 ± 6	74 ± 7	78 ± 8	0,260	0,274			
Flexion genou AR (°)	107 ± 13	97 ± 9	100 ± 11	0,081	0,370			
Flexion genou AV (°)	109 ± 13	106 ± 7	107 ± 11	0,649	0,158			
Vitesse angulaire maximale								
Extension cheville AR (°·s ⁻¹)	652 ± 108	637 ± 75	654 ± 142	0,916	0,071			
Extension cheville AV (°·s ⁻¹)	397 ± 91	409 ± 91	437 ± 107	0,581	0,177			
Extension genou AR (°·s ⁻¹)	522 ± 96	581 ± 140	561 ± 146	0,460	0,211			
Extension genou AV (°·s ⁻¹)	373 ± 60***	475 ± 44	481 ± 93	<0,001	0,631	***	*	
Vitesse verticale maximale								
Hanche AR (m·s ⁻¹)	2,02 ± 0,18	2,24 ± 0,27	2,16 ± 0,30	0,078	0,373			
Hanche AV (m·s ⁻¹)	1,31 ± 0,20**	1,53 ± 0,25	1,60 ± 0,22	0,006	0,513	*	**	

Tableau 5.3 – Variables cinématiques des membres inférieurs au cours du 1^{er} service en fonction de l'âge des joueurs. *** : $P < 0,001$, ** : $P < 0,01$, * : $P < 0,05$. Les variables en gras tendent à être différentes ($0,05 < P < 0,1$). AR : arrière, AV : avant.

5.3.1.4 Variables cinématiques du tronc et du membre supérieur dominant

En fonction de l'âge, la raquette n'est pas amenée de la même façon dans le dos à la fin de la phase d'armé. En effet, au moment où l'axe longitudinal de la raquette est parallèle au sol, l'angle formé entre l'axe transverse de la raquette et l'axe horizontal est significativement inférieur pour le groupe U14G par rapport au groupe +16G (Tableau 5.4), reflétant une raquette davantage orientée vers le ciel pour les plus jeunes joueurs. De plus, la vitesse maximale de rotation antéropostérieure du tronc augmente progressivement avec l'âge, conduisant à une différence significative entre les groupes U14G et +16G (Tableau 5.4). Temporellement, la vitesse maximale de rotation longitudinale des hanches intervient significativement plus tard au cours du service pour les +16G par rapport aux U14G (respectivement $91,9 \pm 3,1$ % contre $88,8 \pm 2,5$ %, $P < 0,05$) (Figure 5.3). Le timing d'apparition de la vitesse maximale de rotation longitudinale des épaules a également lieu plus tard pour les joueurs du groupe +16G, mais cette différence n'est pas significative (U14G : $90,2 \pm 1,9$ %, U16G : $90,1 \pm 2,5$ %, +16G : $91,8 \pm 3,6$ %, $P = 0,261$). Les autres variables cinématiques concernant les positions et les vitesses segmentaires maximales ainsi que les timings d'apparition de ces variables au cours du service sont identiques entre les 3 groupes (Tableau 5.4 et Figure 5.3).

	U14G (n = 15)	U16G (n = 12)	+16G (n = 10)	ANOVA		Post Hoc		
				P	Effect size	U14G vs U16G	U14G vs +16G	U16G vs +16G
Début de la poussée								
Rotation LG des hanches (°)	96 ± 14	93 ± 17	91 ± 14	0,778	0,121			
Angle de séparation (°)	19 ± 12	16 ± 13	11 ± 12	0,243	0,282			
Phase d'armé								
Angle de séparation max. (°)	29 ± 12	32 ± 12	25 ± 12	0,485	0,204			
Extension max. du tronc (°)	14 ± 5	12 ± 6	15 ± 6	0,420	0,225			
Inclinaison latérale max. du tronc (°)	-39 ± 6	-33 ± 9	-34 ± 8	0,131	0,335			
Flexion max. du coude (°)	55 ± 10	57 ± 13	55 ± 10	0,788	0,119			
ABD min. de l'épaule (°)	51 ± 11	61 ± 19	58 ± 15	0,263	0,275			
ABDHOR max. de l'épaule (°)	11 ± 11	9 ± 13	13 ± 9	0,663	0,154			
ADDHOR max. de l'épaule (°)	25 ± 8	21 ± 8	19 ± 9	0,178	0,315			
RME de l'épaule (°)	176 ± 3	175 ± 3	176 ± 4	0,701	0,144			
Angle de la raquette (°)	24 ± 18*	38 ± 22	45 ± 22	0,039	0,417		*	
V _M rotation LG des épaules (°·s ⁻¹)	676 ± 85	665 ± 72	648 ± 81	0,692	0,146			
V _M rotation LG des hanches (°·s ⁻¹)	546 ± 72	533 ± 79	504 ± 61	0,363	0,240			
V _M flexion du tronc (°·s ⁻¹)	277 ± 39	248 ± 51	256 ± 49	0,228	0,289			
Phase d'accélération								
V _M RI de l'épaule (°·s ⁻¹)	2405 ± 305	2418 ± 613	2368 ± 556	0,971	0,041			
V _M flexion du poignet (°·s ⁻¹)	1389 ± 299	1521 ± 227	1601 ± 343	0,199	0,301			
V _M extension du coude (°·s ⁻¹)	1655 ± 150	1702 ± 185	1764 ± 176	0,299	0,262			
V _M rotation AP du tronc (°·s ⁻¹)	131 ± 34*	148 ± 43	174 ± 37	0,030	0,432		*	
Impact de balle								
Extension du coude (°)	154 ± 5	154 ± 6	154 ± 5	0,893	0,083			
Inclinaison latérale du tronc (°)	56 ± 10	53 ± 7	49 ± 5	0,149	0,327			
ABD de l'épaule (°)	113 ± 7	114 ± 7	117 ± 10	0,375	0,236			

Tableau 5.4 – Variables cinématiques du tronc et du membre supérieur dominant au cours du 1^{er} service en fonction de l'âge des joueurs. * : P < 0,05. max : maximal, min : minimal, LG : longitudinale, ABD : abduction, ABDHOR : abduction horizontale, ADDHOR : adduction horizontale, RME : rotation maximale externe, V_M : vitesse maximale, RI : rotation interne, AP : antéropostérieure.

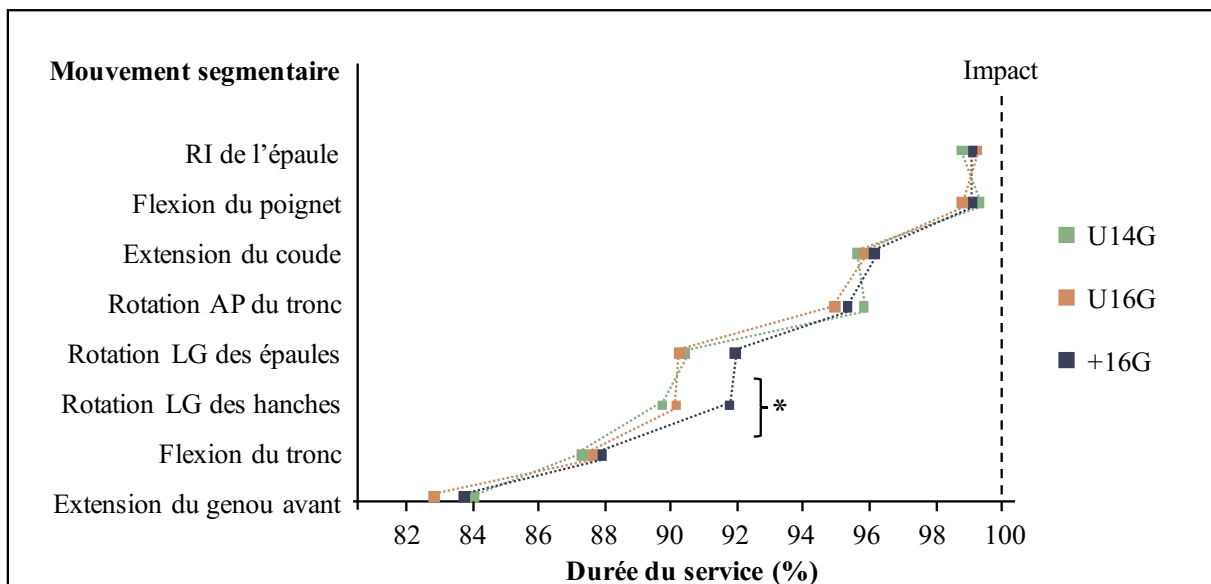


Figure 5.3 – Timings d'apparition des vitesses angulaires maximales au cours du 1^{er} service en fonction de l'âge des joueurs. * : P < 0,05. RI : rotation interne, AP : antéropostérieure, LG : longitudinale.

5.3.1.5 Contraintes articulaires maximales du membre supérieur

Les pics de forces proximale et inférieure à l'épaule, de moment d'adduction horizontale à l'épaule, de forces proximale, antérieure et médiale au coude et de force médiale au poignet augmentent progressivement avec l'âge des joueurs. Pour tous ces paramètres, une différence significative a été identifiée entre U14G et +16G, et des « effect size » larges ou moyens ont été calculés (Tableau 5.5). Nos résultats montrent également une augmentation significative du pic de moment d'adduction horizontale à l'épaule et du pic de force médiale au poignet entre les groupes U16G et +16G. Enfin, les pics de force antérieure à l'épaule ($P = 0,057$) et de force proximale au poignet ($P = 0,057$) ont tendance à augmenter avec l'âge.

	U14G (n = 15)	U16G (n = 12)	+16G (n = 10)	ANOVA		Post Hoc		
				P	Effect size	U14G vs U16G	U14G vs +16G	U16G vs +16G
Force à l'épaule ($N \cdot kg^{-1}$)								
Force proximale	5,2 ± 0,6**	5,5 ± 0,7	6,2 ± 0,9	0,005	0,515		**	
Force antérieure	2,9 ± 0,5	3,1 ± 0,6	3,4 ± 0,6	0,057	0,394			
Force inférieure	2,3 ± 0,4**	2,7 ± 0,5	3,3 ± 1,0	0,004	0,528		**	
Moment de force à l'épaule ($N \cdot m \cdot kg^{-1} \cdot m^{-1}$)								
Moment de rotation interne	56,7 ± 4,3	53,7 ± 5,6	59,1 ± 7,4	0,101	0,353			
Moment d'adduction	38,2 ± 10,4	39,7 ± 8,4	46,1 ± 9,4	0,160	0,339			
Moment d'adduction horizontale	39,2 ± 5,1**	40,8 ± 6,4	49,9 ± 10,7	0,003	0,536		**	*
Moment d'abduction horizontale	25,6 ± 5,9	28,4 ± 7,4	29,6 ± 5,0	0,260	0,276			
Force au coude ($N \cdot kg^{-1}$)								
Force proximale	5,2 ± 0,6*	5,4 ± 0,7	6,1 ± 0,9	0,011	0,484		*	
Force antérieure	1,5 ± 0,3**	1,7 ± 0,3	2,0 ± 0,5	0,009	0,490		**	
Force médiale	2,4 ± 0,3**	2,5 ± 0,4	2,8 ± 0,3	0,005	0,517		**	
Moment de force au coude ($N \cdot m \cdot kg^{-1} \cdot m^{-1}$)								
Moment de varus	57,9 ± 4,8	55,1 ± 5,8	59,8 ± 6,9	0,167	0,315			
Force au poignet ($N \cdot kg^{-1}$)								
Force proximale	3,2 ± 0,3	3,3 ± 0,4	3,6 ± 0,5	0,057	0,394			
Force antérieure	3,0 ± 0,2	2,9 ± 0,4	3,2 ± 0,3	0,870	0,363			
Force médiale	0,9 ± 0,1**	0,9 ± 0,1	1,1 ± 0,2	0,002	0,557		**	*

Tableau 5.5 – Valeurs maximales de contraintes articulaires générées au cours du 1^{er} service en fonction de l'âge des joueurs. **: $P < 0,01$, * : $P < 0,05$. Les variables en gras tendent à être différentes ($0,05 < P < 0,1$). N : newton.

5.3.2 Influence de l'âge chez les filles

5.3.2.1 Caractéristiques des joueuses

En U14F, les joueuses sont plus légères et ont tendance à être plus petites ($P = 0,081$) que les joueuses des deux autres groupes (Tableau 5.2). Elles ont aussi tendance à utiliser une raquette moins lourde que celle de leurs aînées (environ 10 g, $P = 0,061$). Le RA est la technique de service préférentielle au sein des 3 groupes, et la proportion de joueuses utilisant ce type d'appuis augmente avec l'âge (57 % pour les U14F, 78 % pour les U16F et 83 % pour les +16F) (Tableau 5.2).

5.3.2.2 Vitesse de balle et position de l'impact

La vitesse du 1^{er} service est significativement supérieure pour le groupe +16F par rapport au groupe U14F ($158 \pm 10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ contre $143 \pm 8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, $P < 0,05$ et $r = 0,463$), alors qu'aucune différence n'est observée entre U16F et +16F ($151 \pm 11 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ pour le groupe U16F) (Figure 5.4). Pour les groupes U14F et U16F, une corrélation significative et positive existe entre la vitesse du service et la taille des joueuses ($r = 0,688$ et $P < 0,001$). L'impact de balle est significativement plus haut pour le groupe +16F ($2,54 \pm 0,08 \text{ m}$) par rapport au groupe U14F ($2,38 \pm 0,05 \text{ m}$, $P < 0,01$ et $r = 0,532$) (Figure 5.5). Néanmoins, la hauteur d'impact relative à la taille des joueuses est identique entre les 3 groupes (de 1,45 à 1,48 fois la taille des joueuses). Aucune différence significative n'existe pour la position antéropostérieure de l'impact (entre 0,49 et 0,57 m vers l'avant) ni pour la position latérale de l'impact (entre 0,04 et 0,08 m à gauche du repère du pied avant pour une joueuse droitrière) (Figure 5.5).

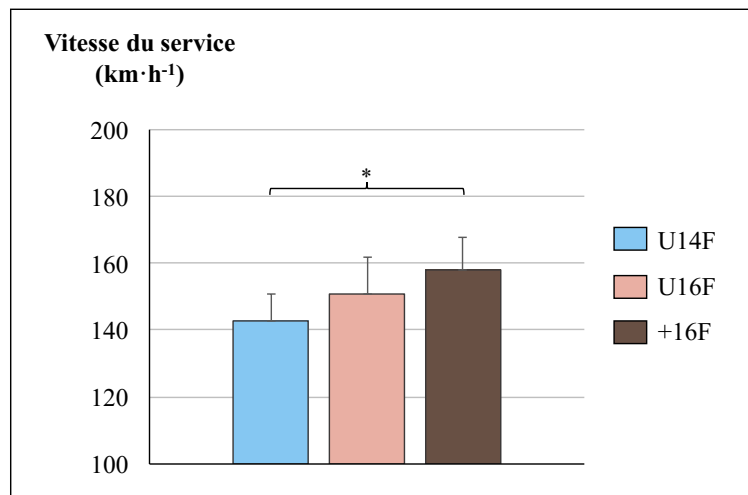


Figure 5.4 – Vitesse du 1^{er} service en fonction de l'âge des joueuses. * : $P < 0,05$.

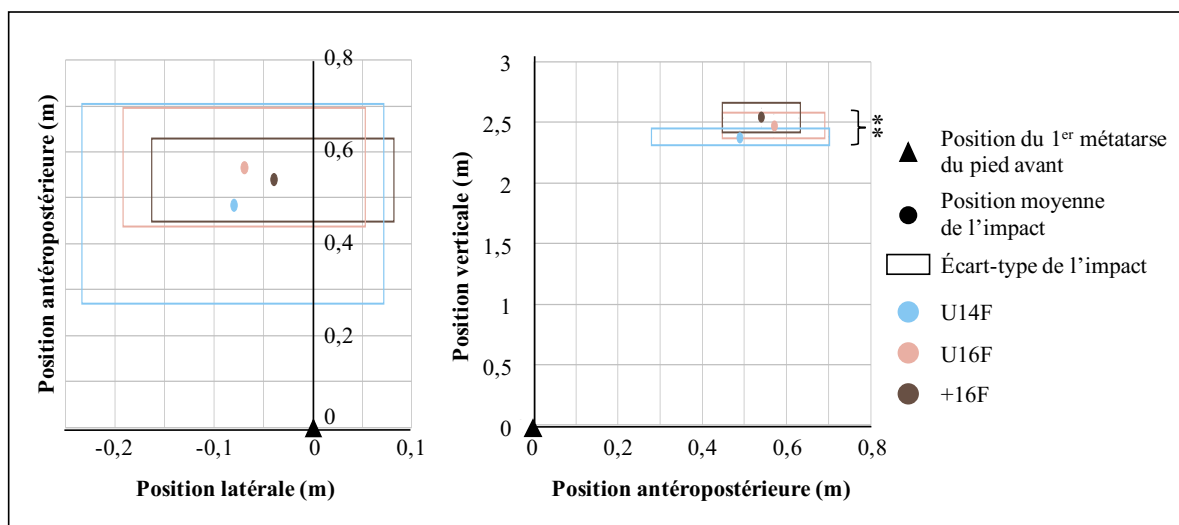


Figure 5.5 – Représentation schématique d'une vue de dessus (à gauche) et d'une vue de côté (à droite) montrant la position latérale (axe X), antéropostérieure (axe Y) et verticale (axe Z) de l'impact du 1^{er} service en fonction de l'âge des joueuses. ** : $P < 0,01$.

5.3.2.3 Variables cinématiques des membres inférieurs

Concernant le genou arrière, la flexion maximale est plus prononcée pour les U16F et +16F (95 – 98°) par rapport au groupe U14F (106°, P < 0,001), mais la vitesse maximale d’extension lors de la poussée n’est pas significativement différente entre les 3 groupes. À l’inverse, la vitesse maximale d’extension du genou avant augmente progressivement avec l’âge (P < 0,05 entre le groupe U14F et le groupe +16F) alors que l’amplitude de flexion du genou est identique entre les 3 groupes. Les autres variables cinématiques, parmi lesquelles la vitesse verticale maximale de la hanche avant et de la hanche arrière, sont indépendantes de l’âge des joueuses (Tableau 5.6).

	U14F (n = 7)	U16F (n = 18)	+16F (n = 12)	ANOVA		Post Hoc		
				P	Effect size	U14F vs U16F	U14F vs +16F	U16F vs +16F
Angle de flexion maximale								
Flexion cheville AR (°)	85 ± 14	86 ± 8	83 ± 10	0,673	0,151			
Flexion cheville AV (°)	77 ± 8	75 ± 8	72 ± 11	0,427	0,221			
Flexion genou AR (°)	106 ± 4***	98 ± 10	95 ± 8	<0,001	0,459	*	**	
Flexion genou AV (°)	112 ± 13	109 ± 9	106 ± 13	0,627	0,164			
Vitesse angulaire maximale								
Extension cheville AR (°·s ⁻¹)	644 ± 103	721 ± 157	710 ± 193	0,564	0,182			
Extension cheville AV (°·s ⁻¹)	381 ± 88	455 ± 116	472 ± 167	0,329	0,252			
Extension genou AR (°·s ⁻¹)	544 ± 138	605 ± 91	593 ± 125	0,480	0,206			
Extension genou AV (°·s ⁻¹)	411 ± 44*	454 ± 72	515 ± 115	0,030	0,421		*	
Vitesse verticale maximale								
Hanche AR (m·s ⁻¹)	1,97 ± 0,16	2,20 ± 0,27	2,15 ± 0,26	0,132	0,335			
Hanche AV (m·s ⁻¹)	1,35 ± 0,12	1,43 ± 0,26	1,55 ± 0,20	0,125	0,339			

Tableau 5.6 – Variables cinématiques des membres inférieurs au cours du 1^{er} service en fonction de l’âge des joueuses. *** : P < 0,001, ** : P < 0,01, * : P < 0,05. AR : arrière, AV : avant.

5.3.2.4 Variables cinématiques du tronc et membre supérieur dominant

L’angle de séparation mesuré au début de la poussée des jambes tend à diminuer avec l’âge (P = 0,058) (Tableau 5.7). L’angle de séparation maximal, calculé ensuite au cours de la phase d’armé, est significativement inférieur en +16F par rapport au groupe U14F (Tableau 5.7). Toutes les autres variables cinématiques concernant le tronc et le membre supérieur sont identiques entre les 3 groupes (Tableau 5.7 et Figure 5.6).

	U14F (n = 7)	U16F (n = 18)	+16F (n = 12)	ANOVA		Post Hoc		
				P	Effect size	U14F vs U16F	U14F vs +16F	U16F vs +16F
Début de la poussée								
Rotation LG des hanches (°)	85 ± 16	99 ± 21	94 ± 17	0,225	0,290			
Angle de séparation (°)	21 ± 9	18 ± 12	9 ± 12	0,058	0,392			
Phase d'armé								
Angle de séparation max. (°)	37 ± 12*	30 ± 11	22 ± 8	0,022	0,449		*	
Extension max. du tronc (°)	10 ± 7	14 ± 6	16 ± 6	0,124	0,364			
Inclinaison latérale max. du tronc (°)	-30 ± 9	-35 ± 9	-34 ± 6	0,427	0,223			
Flexion max. du coude (°)	53 ± 10	52 ± 11	52 ± 14	0,968	0,044			
ABD min. de l'épaule (°)	62 ± 14	56 ± 18	55 ± 14	0,615	0,168			
ABDHOR max. de l'épaule (°)	8 ± 11	8 ± 14	11 ± 13	0,824	0,106			
ADDHOR max. de l'épaule (°)	22 ± 8	24 ± 13	24 ± 10	0,959	0,050			
RME de l'épaule (°)	176 ± 2	174 ± 3	175 ± 3	0,446	0,215			
Angle de la raquette (°)	55 ± 26	35 ± 25	37 ± 23	0,193	0,327			
V _M rotation LG des épaules (°·s ⁻¹)	706 ± 76	723 ± 123	665 ± 96	0,356	0,243			
V _M rotation LG des hanches (°·s ⁻¹)	562 ± 81	571 ± 103	520 ± 102	0,387	0,233			
V _M flexion du tronc (°·s ⁻¹)	271 ± 18	251 ± 34	264 ± 38	0,324	0,253			
Phase d'accélération								
V _M RI de l'épaule (°·s ⁻¹)	1850 ± 435	2046 ± 478	1987 ± 348	0,601	0,172			
V _M flexion du poignet (°·s ⁻¹)	1260 ± 250	1174 ± 145	1217 ± 232	0,603	0,171			
V _M extension du coude (°·s ⁻¹)	1582 ± 73	1632 ± 203	1585 ± 210	0,304	0,132			
V _M rotation AP du tronc (°·s ⁻¹)	150 ± 49	156 ± 55	164 ± 60	0,859	0,099			
Impact de balle								
Extension du coude (°)	153 ± 2	153 ± 7	149 ± 4	0,155	0,327			
Inclinaison latérale du tronc (°)	47 ± 13	47 ± 6	46 ± 7	0,906	0,081			
ABD de l'épaule (°)	109 ± 4	113 ± 10	113 ± 8	0,580	0,180			

Tableau 5.7 – Variables cinématiques du tronc et du membre supérieur dominant au cours du 1^{er} service en fonction de l'âge des joueuses. * : P < 0,05. Les variables en gras tendent à être différentes (0,05 < P < 0,1). max : maximal, min : minimal, LG : longitudinale, ABD : abduction, ABDHOR : abduction horizontale, ADDHOR : adduction horizontale, RME : rotation maximale externe, V_M : vitesse maximale, RI : rotation interne, AP : antéropostérieure.

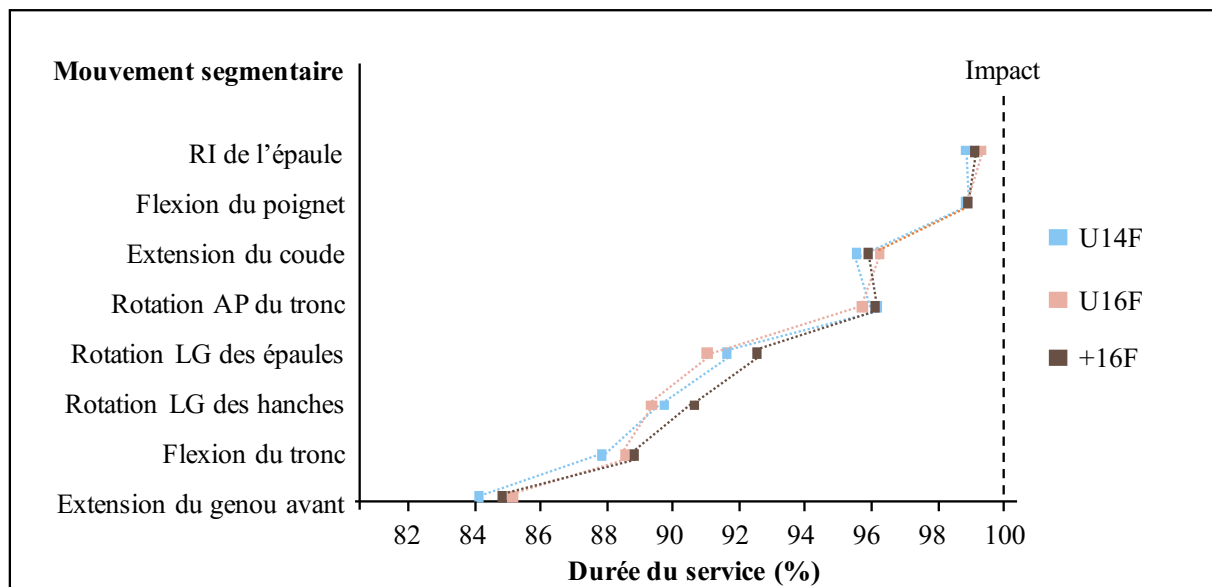


Figure 5.6 – Timings d'apparition des vitesses angulaires maximales au cours du 1^{er} service en fonction de l'âge des joueuses. RI : rotation interne, AP : antéropostérieure, LG : longitudinale.

5.3.2.5 Contraintes articulaires maximales du membre supérieur dominant

Le pic de force antérieure au coude est supérieur en U16F par rapport au groupe U14F ($P < 0,01$ et $r = 0,349$). Pour les 13 autres mesures de contraintes articulaires, aucune différence significative n'est observée entre les 3 groupes de joueuses (Tableau 5.8).

	U14F (n = 7)	U16F (n = 18)	+16F (n = 12)	ANOVA		Post Hoc		
				P	Effect size	U14F vs U16F	U14F vs +16F	U16F vs +16F
Force à l'épaule ($N \cdot kg^{-1}$)								
Force proximale	3,9 ± 0,4	4,3 ± 0,7	4,3 ± 0,6	0,351	0,245			
Force antérieure	2,6 ± 0,5	2,7 ± 0,4	2,7 ± 0,3	0,738	0,133			
Force inférieure	1,9 ± 0,3	2,0 ± 0,3	2,2 ± 0,3	0,140	0,335			
Moment de force à l'épaule ($N \cdot m \cdot kg^{-1} \cdot m^{-1}$)								
Moment de rotation interne	48,8 ± 3,6	51,1 ± 7,9	50,6 ± 7,1	0,757	0,127			
Moment d'adduction	25,6 ± 7,4	27,7 ± 8,6	32,3 ± 7,0	0,180	0,314			
Moment d'adduction horizontale	38,1 ± 6,0	34,7 ± 5,6	36,8 ± 5,9	0,365	0,239			
Moment d'abduction horizontale	24,5 ± 6,1	25,4 ± 5,9	27,0 ± 3,8	0,580	0,178			
Force au coude ($N \cdot kg^{-1}$)								
Force proximale	4,0 ± 0,5	4,5 ± 0,6	4,3 ± 0,6	0,214	0,295			
Force antérieure	1,2 ± 0,1**	1,4 ± 0,2	1,4 ± 0,3	0,009	0,349	**		
Force médiale	2,1 ± 0,1	2,2 ± 0,3	2,2 ± 0,3	0,665	0,153			
Moment de force au coude ($N \cdot m \cdot kg^{-1} \cdot m^{-1}$)								
Moment de varus	50,2 ± 3,5	51,9 ± 7,5	51,8 ± 7,2	0,855	0,096			
Force au poignet ($N \cdot kg^{-1}$)								
Force proximale	2,6 ± 0,3	2,8 ± 0,3	2,8 ± 0,3	0,423	0,222			
Force antérieure	2,7 ± 0,3	2,8 ± 0,3	2,6 ± 0,4	0,523	0,193			
Force médiale	0,8 ± 0,1	0,8 ± 0,2	0,8 ± 0,2	0,561	0,184			

Tableau 5.8 – Valeurs maximales de contraintes articulaires générées au cours du 1^{er} service en fonction de l'âge des joueuses. ** : $P < 0,01$. N : newton.

5.3.3 Influence du sexe

5.3.3.1 Chez les moins de 14 ans

En U14, les garçons tendent à être plus grands que les filles (+ 6 cm). Lors de la phase d'armé, les U14G démontrent une inclinaison latérale maximale du tronc significativement inférieure par rapport aux joueuses U14F. L'angle de la raquette lorsqu'elle descend dans le dos est significativement inférieur pour les U14G, et ils démontrent une inclinaison latérale du tronc au moment de l'impact qui tend à être supérieure ($56 \pm 10^\circ$ vs. $47 \pm 13^\circ$ pour les U14F, $P = 0,096$ et $d = 0,717$). De plus, la vitesse maximale de rotation interne de l'épaule est significativement plus élevée chez les U14G, tout comme la vitesse de balle et la hauteur relative d'impact (Tableau 5.9).

	U14G (n = 15)	U14F (n = 7)	P	Effect size
Caractéristiques des sujets				
Age (ans)	13,4 ± 0,6	13,3 ± 0,5	0,708	0,177
Taille (m)	1,70 ± 0,07	1,64 ± 0,05	0,060	0,979
Masse (kg)	54,9 ± 7,8	49,7 ± 4,9	0,129	0,785
Classement FFT	5/6 à 2/6	5/6 à 0		
Début de la poussée				
Rotation LG des hanches (°)	96 ± 14	85 ± 16	0,106	0,752
Angle de séparation (°)	19 ± 12	22 ± 9	0,659	0,216
Phase d'armé				
V _M hanche AR (m·s ⁻¹)	2,02 ± 0,18	1,97 ± 0,16	0,533	0,297
V _M hanche AV (m·s ⁻¹)	1,31 ± 0,20	1,35 ± 0,12	0,698	0,196
Angle de séparation max. (°)	29 ± 12	37 ± 12	0,194	0,620
Inclinaison latérale max. du tronc (°)	-39 ± 6*	-30 ± 9	0,014	1,134
ABD min. de l'épaule (°)	51 ± 11	62 ± 14	0,069	0,839
Angle de la raquette (°)	24 ± 18**	55 ± 26	0,003	1,406
V _M rotation LG des épaules (°·s ⁻¹)	676 ± 85	706 ± 76	0,439	0,370
V _M rotation LG des hanches (°·s ⁻¹)	546 ± 72	562 ± 82	0,650	0,206
V _M flexion du tronc (°·s ⁻¹)	277 ± 39	271 ± 18	0,702	0,200
Phase d'accélération				
V _M RI de l'épaule (°·s ⁻¹)	2405 ± 305**	1850 ± 435	0,002	1,474
V _M flexion du poignet (°·s ⁻¹)	1389 ± 299	1261 ± 250	0,337	0,466
V _M extension du coude (°·s ⁻¹)	1655 ± 151	1582 ± 73	0,241	0,618
V _M rotation AP du tronc (°·s ⁻¹)	131 ± 34	150 ± 49	0,307	0,445
Impact de balle				
Position latérale (m)	-0,16 ± 0,19	-0,08 ± 0,15	0,266	0,535
Position antéropostérieure (m)	0,57 ± 0,08	0,49 ± 0,21	0,171	0,544
Hauteur relative à la taille	1,48 ± 0,02*	1,45 ± 0,02	0,010	1,245
Vitesse de balle (km·h ⁻¹)	156 ± 9**	143 ± 8	0,006	1,469

Tableau 5.9 – Comparaison des caractéristiques des sujets et des variables cinématiques au service en fonction du sexe chez le moins de 14 ans. ** : P < 0,01, * : P < 0,05. Les variables en gras tendent à être différentes (0,05 < P < 0,1). LG : longitudinale, V_M : vitesse maximale, AR : arrière, AV : avant, max : maximal, min : minimal, ABD : abduction, RI : rotation interne, AP : antéropostérieure.

5.3.3.2 Chez les moins de 16 ans

En U16, les garçons sont significativement plus grands et plus lourds que les filles (+ 8 cm et + 7 kg). Ils frappent la balle plus vite que les filles, leur vitesse maximale de flexion du poignet est significativement supérieure et leur vitesse maximale de rotation interne de l'épaule tend à être plus élevée. Enfin, la hauteur de l'impact est significativement supérieure chez les garçons (+ 15 cm, P < 0,01) la position latérale de l'impact tend à être « plus à gauche » chez les garçons (Tableau 5.10).

	U16G (n = 12)	U16F (n = 18)	P	Effect size
Caractéristiques des sujets				
Age (ans)	14,9 ± 0,7	15,0 ± 0,5	0,704	0,139
Taille (m)	1,77 ± 0,08*	1,69 ± 0,08	0,011	1,010
Masse (kg)	64,8 ± 5,2**	57,8 ± 5,3	0,001	1,357
Classement FFT	15 à -4/6	5/6 à N°55		
Début de la poussée				
Rotation LG des hanches (°)	93 ± 17	99 ± 21	0,423	0,310
Angle de séparation (°)	16 ± 13	18 ± 12	0,743	0,123
Phase d'armé				
V _M hanche AR (m·s ⁻¹)	2,24 ± 0,27	2,20 ± 0,27	0,714	0,138
V _M hanche AV (m·s ⁻¹)	1,53 ± 0,25	1,43 ± 0,26	0,280	0,412
Angle de séparation max. (°)	32 ± 12	30 ± 11	0,665	0,163
Inclinaison latérale max. du tronc (°)	-33 ± 9	-35 ± 9	0,596	0,203
ABD min. de l'épaule (°)	61 ± 19	56 ± 18	0,458	0,279
Angle de la raquette (°)	38 ± 22	35 ± 25	0,740	0,129
V _M rotation LG des épaules (°·s ⁻¹)	676 ± 85	706 ± 76	0,439	0,370
V _M rotation LG des hanches (°·s ⁻¹)	546 ± 72	562 ± 82	0,650	0,206
V _M flexion du tronc (°·s ⁻¹)	248 ± 51	251 ± 34	0,834	0,076
Phase d'accélération				
V _M RI de l'épaule (°·s ⁻¹)	2418 ± 613	2046 ± 478	0,073	0,676
V _M flexion du poignet (°·s ⁻¹)	1521 ± 227***	1174 ± 145	<0,001	1,818
V _M extension du coude (°·s ⁻¹)	1702 ± 185	1632 ± 203	0,346	0,361
V _M rotation AP du tronc (°·s ⁻¹)	148 ± 43	156 ± 55	0,696	0,155
Impact de balle				
Position latérale (m)	-0,17 ± 0,17	-0,07 ± 0,12	0,059	0,706
Position antéropostérieure (m)	0,62 ± 0,18	0,57 ± 0,12	0,341	0,346
Hauteur relative à la taille	1,48 ± 0,03	1,46 ± 0,04	0,263	0,446
Vitesse de balle (km·h ⁻¹)	168 ± 8***	151 ± 12	<0,001	1,772

Tableau 5.10 – Comparaison des caractéristiques des sujets et des variables cinématiques au service en fonction du sexe chez les moins de 16 ans. *** : P < 0,001, ** : P < 0,01, * : P < 0,05. Les variables en gras tendent à être différentes (0,05 < P < 0,1). LG : longitudinale, V_M : vitesse maximale, AR : arrière, AV : avant, max : maximal, min : minimal, ABD : abduction, RI : rotation interne, AP : antéropostérieure.

5.3.3.3 Chez les plus de 16 ans

En +16, les garçons sont significativement plus grands et plus lourds que les filles (+ 16 cm et + 15,4 kg). Ils frappent la balle plus vite que les filles et leurs vitesses maximales de flexion du poignet et d'extension du coude sont significativement supérieures. La position de l'impact de balle est significativement « plus à gauche » (position latérale) et « plus en avant » (position antéropostérieure) pour les garçons. La vitesse maximale de rotation interne de l'épaule tend à être plus élevée chez les +16G (Tableau 5.11).

	+16G (n = 10)	+16F (n = 12)	P	Effect size
Caractéristiques des sujets				
Age (ans)	21,5 ± 2,8	19,1 ± 3,2	0,076	0,805
Taille (m)	1,87 ± 0,06***	1,71 ± 0,04	<0,001	2,979
Masse (kg)	75,7 ± 6,4***	60,3 ± 3,4	<0,001	2,997
Classement FFT	-4/6 à N°8	1/6 à N°5		
Début de la poussée				
Rotation LG des hanches (°)	91 ± 14	94 ± 17	0,672	0,186
Angle de séparation (°)	11 ± 12	9 ± 12	0,753	0,137
Phase d'armé				
V _M hanche AR (m·s ⁻¹)	2,16 ± 0,30	2,15 ± 0,26	0,957	0,023
V _M hanche AV (m·s ⁻¹)	1,60 ± 0,22	1,55 ± 0,20	0,571	0,245
Angle de séparation max. (°)	25 ± 12	22 ± 8	0,468	0,311
Inclinaison latérale max. du tronc (°)	-34 ± 8	-34 ± 6	0,894	0,057
ABD min. de l'épaule (°)	58 ± 15	55 ± 14	0,638	0,204
Angle de la raquette (°)	45 ± 22	37 ± 23	0,403	0,367
V _M rotation LG des épaules (°·s ⁻¹)	648 ± 81	665 ± 96	0,675	0,184
V _M rotation LG des hanches (°·s ⁻¹)	504 ± 61	520 ± 102	0,674	0,187
V _M flexion du tronc (°·s ⁻¹)	256 ± 49	264 ± 38	0,666	0,185
Phase d'accélération				
V _M RI de l'épaule (°·s ⁻¹)	2368 ± 556	1987 ± 348	0,064	0,821
V _M flexion du poignet (°·s ⁻¹)	1601 ± 343**	1217 ± 232	0,006	1,307
V _M extension du coude (°·s ⁻¹)	1764 ± 176	1585 ± 210	0,045	0,924
V _M rotation AP du tronc (°·s ⁻¹)	174 ± 37	164 ± 60	0,632	0,213
Impact de balle				
Position latérale (m)	-0,16 ± 0,13*	-0,04 ± 0,12	0,030	0,215
Position antéropostérieure (m)	0,66 ± 0,08*	0,54 ± 0,09	0,040	0,350
Hauteur relative à la taille	1,48 ± 0,03	1,48 ± 0,03	0,782	0,004
Vitesse de balle (km·h ⁻¹)	185 ± 11***	158 ± 10	<0,001	0,657

Tableau 5.11 – Comparaison des caractéristiques des sujets et des variables cinématiques au service en fonction du sexe chez les plus de 16 ans. *** : P < 0,001, ** : P < 0,01, * : P < 0,05. La variable en gras tend à être différente (0,05 < P < 0,1). LG : longitudinale, V_M : vitesse maximale, AR : arrière, AV : avant, max : maximal, min : minimal, ABD : abduction, RI : rotation interne, AP : antéropostérieure.

5.3.4 Blessures

Notre recueil épidémiologique révèle que 28 des 37 joueurs (76 %) et 29 des 37 joueuses (78 %) ont respectivement rapporté un nombre total de 56 blessures (2 blessures / joueurs blessés) et 52 blessures (1,8 blessures / joueuses blessées). La Figure 5.7 présente la répartition des blessures au niveau du membre supérieur dominant et du tronc pour les 3 groupes masculins et les 3 groupes féminins. Un test de Fisher ne révèle aucune influence de l'âge sur le risque de blessures du membre supérieur et du tronc. Chez les garçons, un seul joueur +16G a déclaré une blessure à l'épaule (10 %) alors qu'elles ont concerné 4 joueurs en U14G (27 %) et 6 joueurs en U16G (50 %) (P = 0,135). Une blessure au coude a été rapportée par 2 joueurs U14G (13 %), 2 joueurs U16G (17 %) et 3 joueurs +16G (30 %). Aucun joueur U14G n'a déclaré de blessures au poignet, alors que cela a été le cas pour 3 joueurs du groupe U16G (25 %) et 2 joueurs du groupe +16G (20 %) (P = 0,091). Chez les filles, 2 joueuses du groupe U14F ont rapporté une blessure au coude (29 %) alors qu'une seule joueuse a subi ce type de blessures dans chacun

des deux autres groupes (6 % en U16F et 8 % en +16F) ($P = 0,292$). À l'inverse, la proportion des joueuses blessées à l'épaule, au poignet et aux abdominaux a augmenté au travers des catégories d'âge. Enfin, aucune joueuse du groupe U14F n'a rapporté de blessures au dos tandis que 5 joueuses U16F (29 %) et 3 joueuses +16F (25 %) ont subi une blessure à cet endroit ($P = 0,438$).

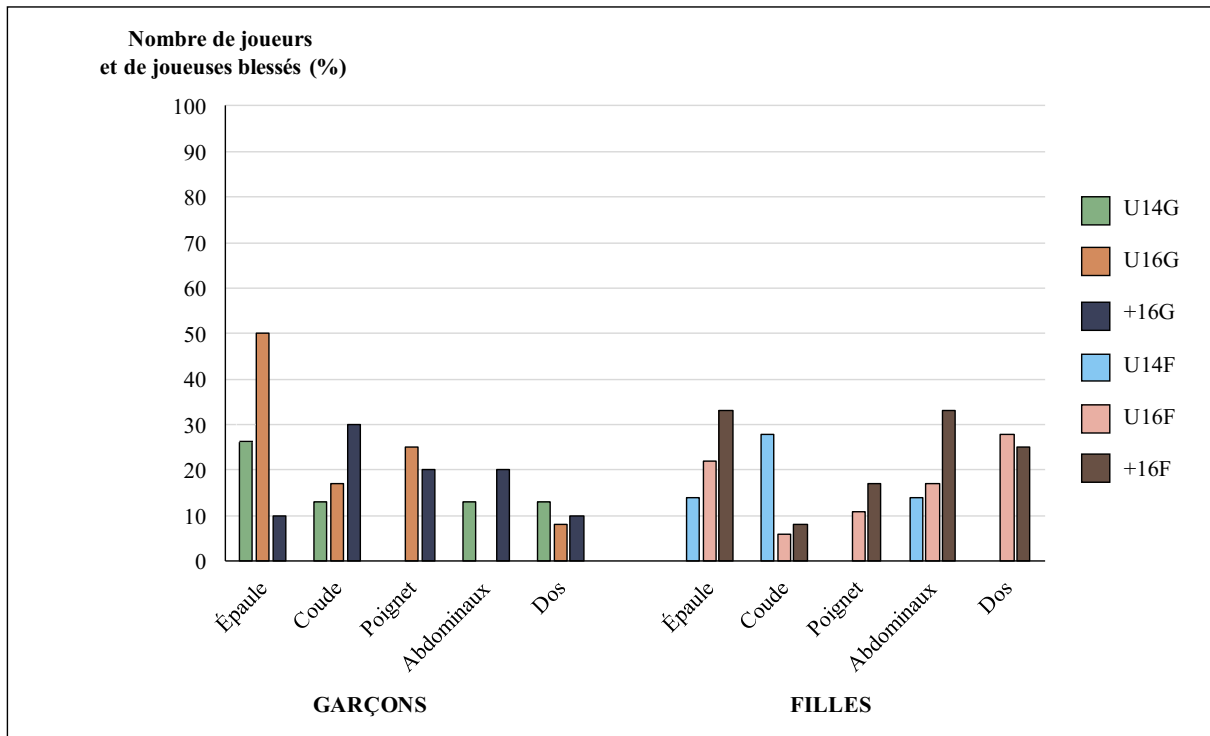


Figure 5.7 – Répartition du nombre de joueurs et de joueuses blessés par région anatomique en fonction de l'âge et du sexe.

5.4 Discussion

5.4.1 Comparaison de la vitesse du service avec les données de la littérature

Plusieurs études ont montré que la vitesse du service augmente avec le niveau d'expertise (Girard et al., 2005; Martin et al., 2014; Ulbricht et al., 2016). Ainsi, la mesure et l'analyse de cette vitesse constituent un outil intéressant pour évaluer le niveau de jeu d'un joueur. Grâce à la multiplication du nombre de tournois professionnels et l'utilisation quasi systématique de radars lors des matchs, la vitesse du service est une donnée largement accessible pour les joueurs et les joueuses adultes (Figure 5.8) (Elliott et al., 2003; Kovalchik et Reid, 2017; Vaverka et al., 2018; Vaverka et Cernosek, 2013). En revanche, les tournois juniors ne sont que très rarement dotés de cette technologie. Seule l'étude d'Ulbricht et al. (2016) permet d'avoir une idée de la vitesse du service pour des joueurs et des joueuses de niveau national entre 12 et 16 ans (Figure 5.8). La vitesse de balle enregistrée pour chacun de nos sous-groupes est en accord avec l'ensemble des valeurs retrouvées dans la littérature

(Figure 5.8), confirmant ainsi le haut niveau d'expertise des joueurs et des joueuses impliqués dans notre étude.

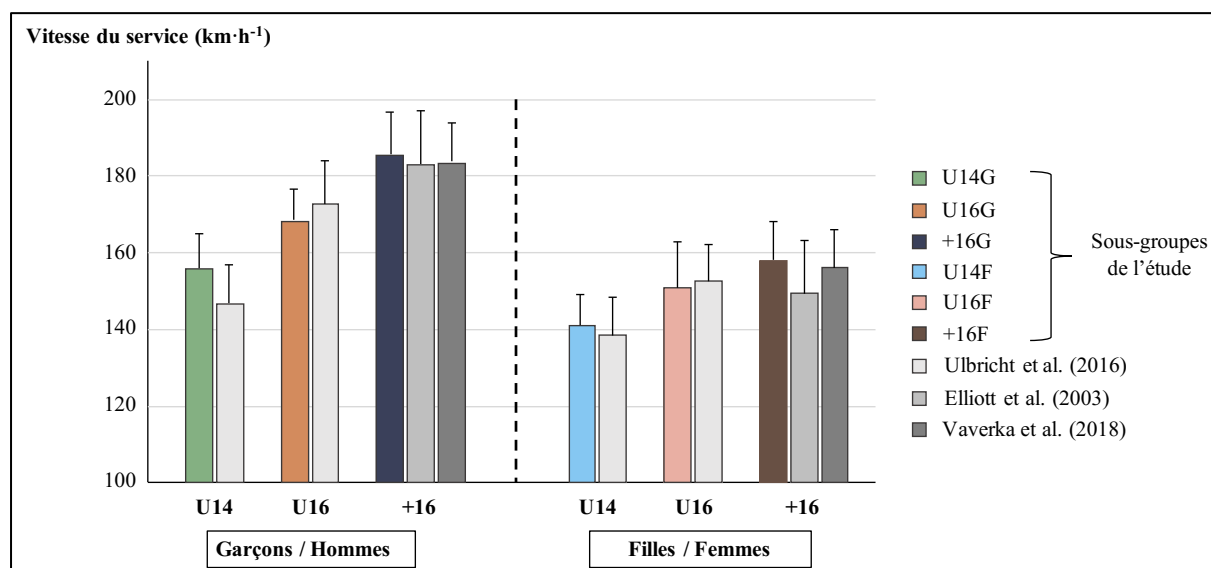


Figure 5.8 – Comparaison de la vitesse du 1^{er} service mesurée pour les sous-groupes de notre étude avec les données disponibles pour des jeunes joueurs et joueuses de niveau national (Ulbricht et al., 2016) et pour des joueurs et des joueuses professionnels adultes (Elliott et al., 2003; Vaverka et al., 2018).

5.4.2 Évolution du service en fonction des catégories d'âge

5.4.2.1 Influence de l'âge sur la vitesse de balle

Nos résultats révèlent que la vitesse du service augmente progressivement entre 12 ans et 16 ans chez les garçons (Figure 5.1). Chez les filles, les joueuses +16F servent significativement plus vite que celles du groupe U14F. En revanche, aucune différence n'est observée entre les catégories U16F et +16F (Figure 5.4). De précédents travaux ont montré que les joueuses atteignent entre 15 et 18 ans une performance en vitesse de service proche des standards du haut niveau (Kovalchik et Reid, 2017; Whiteside et al., 2013), et nos résultats confirment cette idée. Dans la mesure où la vitesse du service est un élément qui conditionne l'issue d'un match professionnel (Cross et Pollard, 2009; Whiteside et Reid, 2017), il n'est pas surprenant de constater que les filles obtiennent plus rapidement des résultats sur le circuit professionnel par rapport aux garçons (Figure 5.9). Amanda Anisimova (21^{ème} mondiale à 18 ans), Cori Gauff (51^{ème} mondiale à 15 ans) ou encore Bianca Andreescu (vainqueur de l'US Open à 19 ans) sont trois joueuses qui font preuve d'une remarquable maturité pour leur jeune âge, et ces dernières n'ont pas d'équivalent sur le circuit professionnel masculin.

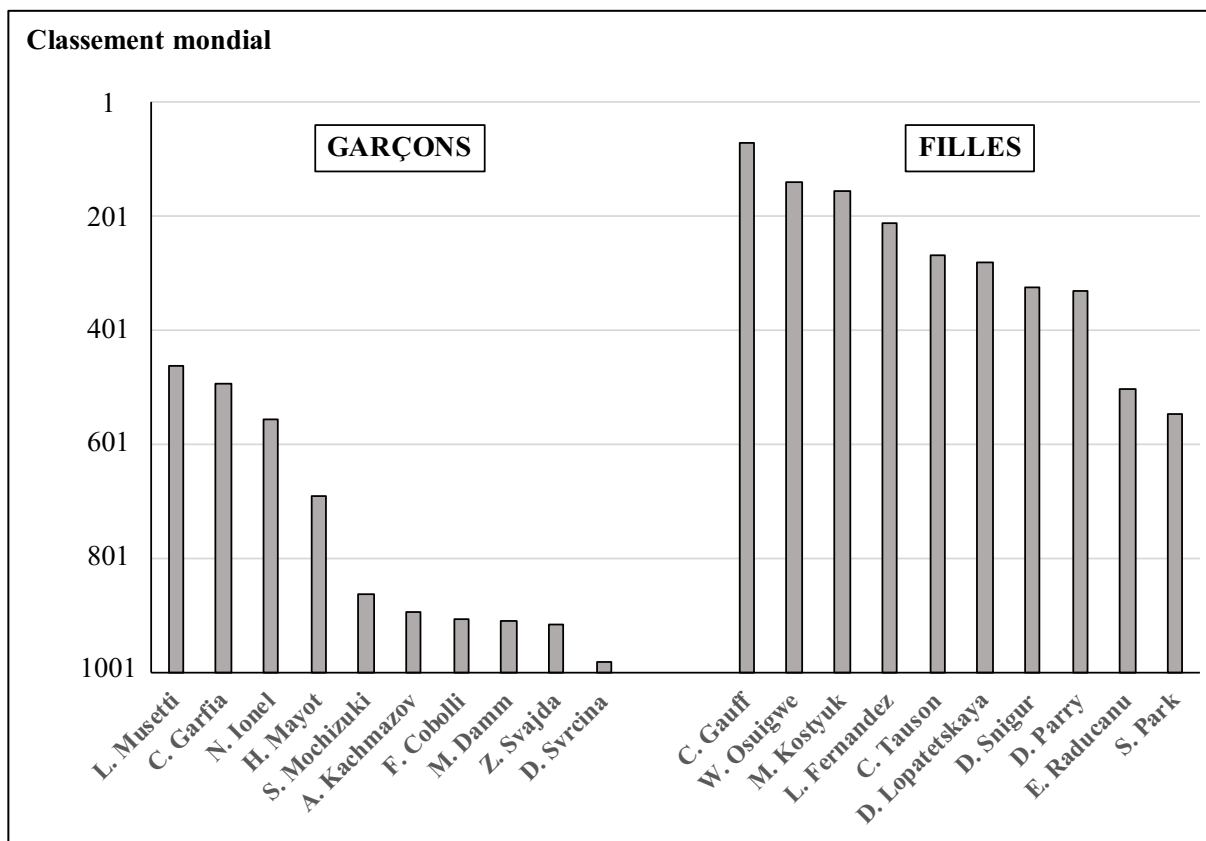


Figure 5.9 – Classement mondial des 10 meilleurs joueurs et joueuses de moins de 18 ans à la fin de la saison 2019 (www.atptour.com et www.wtatennis.com).

L'évolution de la vitesse de balle avec l'âge peut d'abord être interprétée au regard du développement physique qui intervient au cours de l'adolescence. Dans la littérature, une relation entre la vitesse de balle et la taille a été mise en évidence chez des joueurs et des joueuses professionnels (Bonato et al., 2015; Cross et Pollard, 2009; Vaverka et Cernosek, 2013) ou chez des adolescents de niveau intermédiaire (Sögüt, 2016). Notre étude est la première à établir cette relation chez des jeunes joueurs et des jeunes joueuses de niveau élite. Chez les garçons, l'augmentation significative de la taille entre les 3 groupes (17 cm entre les joueurs U14G et les joueurs +16G) (Tableau 5.1) fournit une première explication quant à l'évolution importante de la vitesse de balle avec l'âge (Figure 5.1). Les différences de taille ne sont pas aussi marquées chez les filles (7 cm entre les joueuses U14F et +16F) (Tableau 5.2), et la vitesse du service augmente moins fortement entre 12 ans et 16 ans (Figure 5.4).

De précédents travaux ont également suggéré une relation entre la force musculaire et la vitesse du service (Fernandez-Fernandez et al., 2013; Hayes et al., 2018; Palmer et al., 2018). Aucune mesure de ce paramètre n'a été entreprise dans notre étude. Toutefois, il est largement reconnu que la force musculaire augmente au cours de l'adolescence, et que cette augmentation est plus marquée chez les garçons que chez les filles (Barber-Westin et al., 2006; Ellenbecker et al., 2007; Sinaki et al., 1996). Nous formulons l'hypothèse que l'augmentation des niveaux de force musculaire avec l'âge contribue à l'augmentation de la vitesse de balle observée dans les deux sexes, avec de façon logique une augmentation plus marquée chez les garçons que chez les filles (Figure 5.1 et Figure 5.4). Notre étude a pour objectif d'identifier les éléments techniques responsables de l'augmentation de la vitesse du service avec l'âge. Toutefois, il

serait intéressant dans de futurs travaux de compléter les résultats avec une mesure des niveaux de force musculaire, en particulier au niveau du tronc et du membre supérieur.

5.4.2.2 Influence de l'âge sur les variables cinématiques du service

5.4.2.2.1 Chez les garçons

La poussée des jambes est une action essentielle lors du service, considérée comme un précurseur nécessaire à l'optimisation des vitesses segmentaires au niveau du tronc et du membre supérieur (Reid et al., 2008). La vitesse verticale maximale des hanches étant un critère pertinent pour objectiver l'efficacité de cette action (Whiteside et al., 2013), nos résultats démontrent que la poussée des jambes s'améliore chez les garçons jusqu'à 14 – 15 ans (Tableau 5.3). Les vitesses maximales des hanches mesurées pour les groupes U16G et +16G sont d'ailleurs très proches de celles rapportées dans la littérature pour des joueurs élités adultes (hanche arrière : $2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, hanche avant : $1,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) (Reid, Elliott et Alderson, 2007; Sweeney et al., 2012). Ces vitesses sont plus faibles pour les U14G, et ce résultat pourrait d'abord être le reflet d'un déficit de force des membres inférieurs par rapport aux joueurs plus âgés (Barber-Westin et al., 2006; Ellenbecker et al., 2007). L'amélioration de la poussée des jambes permet théoriquement d'optimiser la position de l'impact de balle vers le haut (Girard et al., 2005), ce qui favorise la réussite du service et l'augmentation de la vitesse de balle (Brechbuhl et al., 2001; Brody, 2003; Chow et al., 2003). Pourtant, dans notre étude, seule l'augmentation de la taille des joueurs semble expliquer l'augmentation de la hauteur absolue de l'impact avec l'âge (Tableau 5.1 et Figure 5.2). En effet, aucune différence n'est retrouvée entre les 3 groupes concernant la hauteur de l'impact relative à la taille des joueurs (1,48 fois la taille). Plusieurs travaux ont montré que les joueurs élités adultes frappent la balle à une hauteur qui représente environ 1,5 fois leur taille (Chow et al., 2003; Elliott et Wood, 1983; Girard et al., 2005), et nos résultats confirment que ce critère de performance est commun à l'ensemble des joueurs élités dès l'âge de 12 ans. L'amélioration de la poussée des jambes des groupes U16G et +16G pourrait en revanche être à l'origine d'une position d'impact légèrement plus avancée dans le terrain (respectivement + 0,05 m et + 0,09 m par rapport aux joueurs U14G, $P = 0,105$) (Figure 5.2). Bien que les avantages de cette organisation soient difficilement quantifiables et probablement assez minimes, une frappe de balle plus « à l'intérieur du terrain » favorise la réussite du service et permet d'atteindre des zones plus courtes sur les services extérieurs (ouverture des angles).

Par ailleurs, l'extension des chevilles est une action qui affecte en tout premier lieu l'efficacité de la poussée des jambes au service (Whiteside et al., 2013). De façon intéressante, nos résultats révèlent que la vitesse maximale d'extension des chevilles est indépendante de l'âge à partir de 12 ans (Tableau 5.3). Les entraîneurs ne sont pourtant pas toujours sensibles à l'action des chevilles dans la poussée des jambes au service. Ils préfèrent généralement s'intéresser à la flexion maximale des genoux, qui est un repère visuel plus simple à observer, pour objectiver l'efficacité de la poussée des jambes (Elliott et Reid, 2004; Girard et al., 2007; Reid et al., 2008). Nos résultats montrent que la flexion maximale du genou arrière tend à diminuer avec l'âge ($P = 0,061$) alors que la flexion maximale du genou avant n'est pas modifiée. Dans le même temps, la vitesse maximale d'extension du genou avant augmente progressivement tandis que celle du genou arrière reste inchangée (Tableau 5.3). Ces résultats laissent penser que l'amplitude de flexion des genoux est globalement suffisante chez les joueurs élités et qu'elle ne correspond plus à un critère pertinent pour définir l'efficacité de la poussée des jambes au service (Whiteside et al., 2013). De plus, l'augmentation progressive de

la vitesse maximale d'extension du genou avant avec l'âge suggère une importance de plus en plus marquée de la jambe avant dans la propulsion du joueur au service, celle-ci jouant surtout un rôle dans l'équilibre du joueur dans les premières années d'apprentissage (Genevois, 2014; Martin, 2015).

Finalement, les résultats concernant les membres inférieurs peuvent être interprétés au regard de la technique d'appuis utilisée. La répartition entre le RA et le SRA est homogène dans le groupe U14G (respectivement 47 % et 53 %) (Tableau 5.1). En revanche, les joueurs des groupes U16G et +16G utilisent majoritairement le RA (67 % pour les U16G et 70 % pour les +16G), ce qui correspond à la proportion observée lors du tournoi de Roland-Garros 2007 pour des joueurs professionnels (Renoult, 2007). Plusieurs travaux de la littérature ont rapporté chez des joueurs adultes une augmentation de la flexion du genou arrière avec le RA, mais aussi une augmentation de l'explosivité de la poussée des jambes et de la vitesse de balle (Genevois, 2014; Martin et al., 2012; Reid et al., 2008; Renoult, 2007). Ainsi, nous pouvons supposer que les modifications des paramètres cinématiques des membres inférieurs observées dans les groupes U16G et +16G sont uniquement le reflet de la plus grande proportion de joueurs utilisant le service RA dans ces deux groupes. **L'étude 2 s'attachera à explorer l'influence de la technique d'appuis sur la poussée des jambes au service et plus globalement sur la performance des jeunes joueurs élités.**

Concernant le tronc et les membres supérieurs, nos résultats soulignent que de nombreux paramètres cinématiques sont identiques entre les 3 groupes (Tableau 5.4 et Figure 5.3). Ces résultats sont relativement surprenants au regard des différences retrouvées pour la vitesse du service (Figure 5.1). Par exemple, les vitesses d'extension du coude, de flexion du poignet et de rotation interne de l'épaule sont les vitesses segmentaires qui contribuent le plus à la vitesse de la raquette au service (Elliott et al., 1995; Gordon et Dapena, 2006; Tanabe et Ito, 2007), et ces 3 vitesses segmentaires n'augmentent pas entre les groupes U14G, U16G et +16G (Tableau 5.4). Toutefois, la contribution d'une articulation à la vitesse de la raquette correspond au produit de la vitesse segmentaire par le rayon de rotation (Chu et al., 2009). Puisque les joueurs du groupe U14G sont significativement plus petits que les joueurs des deux autres groupes (Tableau 5.1), nous pouvons émettre l'hypothèse qu'ils ont aussi un bras et un avant-bras plus courts, ce qui conduit à une vitesse de raquette plus faible et donc une vitesse de balle inférieure. Sans négliger les différences existantes entre la biomécanique du service et celle du lancer (Reid et al., 2015), nos résultats font écho à ceux d'une étude au baseball ayant montré que les paramètres cinématiques du pitch évoluent essentiellement entre 9 et 12 ans (Fleisig et al., 2018). Les différences retrouvées entre nos 3 groupes concernant la vitesse de balle pourraient aussi être en lien avec l'augmentation progressive avec l'âge de la vitesse maximale de rotation antéropostérieure du tronc (Tableau 5.4). Dans la littérature, une relation positive a été établie entre le moment cinétique autour de l'axe antéropostérieur et la vitesse du service de joueurs adultes (Bahamonde, 2000 ;Martin, Kulpa, Delamarche et Bideau, 2013). L'augmentation de la vitesse de rotation antéropostérieure du tronc ne s'explique pas par une modification de l'inclinaison latérale du tronc pendant la phase d'armé du service (Tableau 5.4), qui reflète à cet instant la mise en tension des muscles abdominaux du côté controlatéral (Maquirriain et al., 2007). Elle pourrait en revanche s'expliquer par une augmentation de la force musculaire au niveau du tronc avec l'âge (Sinaki et al., 1996). Elle pourrait aussi être en lien avec l'amélioration de l'efficacité de la poussée des jambes, comme suggéré dans la littérature (Tableau 5.3 et Figure 5.10) (Sweeney et al., 2012; Whiteside et al., 2013), et donc théoriquement avec le type d'appuis utilisé au service. De nouveau, **l'étude 2 aura pour objectif de vérifier cette hypothèse.** Enfin, nos résultats montrent une différence dans le timing d'apparition des vitesses maximales de rotation longitudinale du tronc entre les 3 groupes. Plus précisément, les vitesses maximales de rotation longitudinale des hanches

($P < 0,05$) et des épaules ($P = 0,261$) apparaissent plus tardivement au cours du service des +16G (Figure 5.3). Nous supposons un lien entre le retard de ces vitesses et l'augmentation de la vitesse de rotation antéropostérieure du tronc, et des études supplémentaires devront vérifier cette hypothèse.



Figure 5.10 – L'optimisation du service chez les garçons entre 12 et 16 ans passe par une amélioration de l'explosivité de la poussée des jambes (1) et par une augmentation de la vitesse de rotation antéropostérieure du tronc (2).

Une autre différence entre les 3 groupes concerne la manière dont les joueurs descendent la raquette dans le dos après la position d'armé (PLHR). En effet, l'accélération de la raquette vers le bas s'effectue avec un tamis plus ouvert (« raquette en plateau ») pour le groupe U14G que pour le groupe +16G (Tableau 5.4). Aucune étude biomécanique ne fournit de données concrètes sur cette organisation, bien que celle-ci soit définie par les entraîneurs comme une erreur technique du service (Smith, 2004; Williams et Petersen, 2000). **Nous nous intéresserons plus particulièrement à l'influence du service en plateau sur la performance et les risques de blessures des jeunes joueurs élités dans l'étude 3 de ce travail de thèse.**

5.4.2.2.2 Chez les filles

Nos résultats montrent une très grande similitude dans la cinématique et dans les timings du service entre les groupes U14F, U16F et +16F (Tableau 5.6, Tableau 5.7 et Figure 5.6). Pour les deux groupes de joueuses plus âgées, la vitesse du service est relativement identique (Figure 5.4) et ces résultats étaient attendus. Aussi, malgré quelques divergences avec notre étude qui sont détaillées dans la suite de cette discussion, Whiteside et al. (2013) ont déjà identifié une technique de service et une vitesse de balle très similaires entre des joueuses élités U16 ($14,6 \pm 0,7$ ans) et des joueuses professionnelles ($21,3 \pm 3,8$ ans). Notre étude permet d'affiner ces résultats en démontrant que la quasi-totalité des éléments techniques qui décrivent le service des joueuses adultes est acquise dès l'âge de 12 ans. Cette observation se reflète d'abord dans l'efficacité de la poussée des jambes avec une vitesse verticale maximale des hanches qui est identique entre les 3 groupes (Tableau 5.6). Ce résultat semble logique au regard d'une

précédente étude qui n'a pas montré de différence concernant les niveaux de force des membres inférieurs lors de tests isocinétiques entre des athlètes féminines de 13 ans et de 17 ans (Barber-Westin et al., 2006). De leur côté, Whiteside et al. (2013) ont rapporté une augmentation de la vitesse verticale maximale des hanches entre l'adolescence et l'âge adulte, expliquant l'amélioration de ce paramètre par une augmentation de la vitesse maximale d'extension des chevilles avec l'âge. Toutefois, ces auteurs n'ont pas publié les valeurs de ces vitesses, ce qui nous empêche de proposer une comparaison avec nos résultats. Dans notre étude, dans la mesure où l'efficacité de la poussée des jambes est très comparable entre les 3 groupes, nous retrouvons une position d'impact homogène entre toutes les joueuses. Si la hauteur absolue de l'impact est significativement supérieure pour les joueuses +16F par rapport aux joueuses U14F (Figure 5.5), la hauteur de l'impact relative à la taille est indépendante de l'âge (entre 1,45 et 1,48 fois la taille des joueuses) (Tableau 5.7).

Plusieurs éléments discutés précédemment pour les garçons apparaissent aussi valables pour les filles (Tableau 5.6). Premièrement, la vitesse maximale d'extension des chevilles n'augmente pas avec l'âge et constitue donc un critère de performance déjà en place à partir de 12 ans chez les joueuses élites. Deuxièmement, l'évolution avec l'âge des paramètres cinématiques des genoux (flexion et vitesse d'extension) tend à confirmer les éléments discutés précédemment : la flexion maximale des genoux ne constitue pas un bon indicateur de l'efficacité de la poussée des jambes chez les joueuses élites, et le rôle de la jambe avant dans la propulsion semble s'accroître avec l'âge. Dernièrement, la proportion de joueuses qui utilisent le RA au détriment du SRA augmente avec l'avancée en âge (Tableau 5.2). Dans le groupe +16F, 83 % des joueuses utilisent un service RA, ce qui se rapproche de la proportion observée par Renoult (2007) chez des joueuses professionnelles (76 % avec RA). **Comme chez les garçons, l'étude 2 de ce travail de thèse aura pour objectif de déterminer chez les joueuses l'influence du type d'appuis dans l'efficacité de la poussée des jambes et dans la performance au service.**

Au niveau du tronc et du membre supérieur, nos résultats montrent que les vitesses maximales segmentaires sont stables dès 12 ans et n'évoluent pas dans les catégories supérieures chez les joueuses élites (Tableau 5.7). Ils contredisent ceux de Whiteside et al. (2013) qui ont remarqué une augmentation de la vitesse maximale de flexion du poignet entre des joueuses U16 et des joueuses professionnelles.

L'angle de séparation maximal est le seul paramètre cinématique qui est dépendant de l'âge des joueuses ($37 \pm 12^\circ$ pour les U14F contre $22 \pm 8^\circ$ pour les +16F, $P < 0,05$) (Tableau 5.7). Ce résultat signifie que les jeunes joueuses procèdent à un vissage des épaules sur les hanches plus important que leurs aînées au cours de la phase d'armé (Figure 5.11). Comme l'ont démontré les travaux de Whiteside et al. (2013), cette différence n'a aucune répercussion sur les vitesses maximales de rotation longitudinale des hanches et des épaules (Tableau 5.7). L'augmentation de l'angle de séparation reflète une mise en tension accrue des muscles abdominaux et pourrait être à l'origine d'une augmentation des contraintes au niveau du tronc (Chu et al., 2009; Dowling et al., 2016). Notre recueil épidémiologique ne nous permet pourtant pas de conclure à un risque de blessures du tronc supérieur pour les U14F puisqu'une seule joueuse de ce groupe (14 %) s'est blessée aux abdominaux et aucune ne s'est blessée au dos durant l'année précédant l'analyse biomécanique du service. En comparaison, les blessures aux abdominaux ont concerné 33 % des joueuses +16F, et les blessures au dos environ 25 % des joueuses U16F et +16F (Figure 5.7). Toutefois, il est utile de rappeler que les mécanismes responsables d'une blessure chronique peuvent être initiés bien avant l'apparition de la blessure en question (Andrews et Fleisig, 1998; Bahr et Holme, 2003). Autrement dit, un angle de séparation prononcé au cours du service pourrait représenter une organisation technique

traumatisante pour la joueuse mais avec des répercussions sur son intégrité physique largement décalées dans le temps. Une investigation plus précise du lien entre l'angle de séparation au service et les blessures au niveau du tronc nécessitera d'autres études et la mise en place d'un suivi longitudinal couplant des analyses biomécaniques répétées et un suivi des blessures sur plusieurs années.



Figure 5.11 – Exemple de deux joueuses au moment du début de la descente de la raquette dans le dos, avec un vissage des épaules par rapport aux hanches plus prononcé pour une joueuse de 13 ans (à gauche) que pour une joueuse de 19 ans (à droite).

5.4.2.3 Influence de l'âge sur les contraintes articulaires maximales du membre supérieur

5.4.2.3.1 Chez les garçons

La majorité des paramètres dynamiques mesurés lors du service augmente de façon progressive avec l'âge des joueurs (Tableau 5.5). Même si la relation entre la vitesse du service et les contraintes articulaires du membre supérieur reste controversée dans la littérature (Elliott et al., 2003; Martin et al., 2014), ce résultat était plutôt attendu au regard de l'évolution de la vitesse du service entre les 3 groupes (Figure 5.1). Lors du lancer au baseball, Fleisig et al. (2018) ont rapporté une augmentation importante des contraintes articulaires entre 13 et 15 ans, c'est-à-dire au début supposé de la période de puberté des garçons. Nos résultats laissent plutôt apparaître une évolution progressive des contraintes articulaires entre 12 et 16 ans dans la mesure où l'analyse statistique met surtout en évidence des contraintes articulaires significativement différentes entre les groupes U14G et +16G.

À l'épaule, le pic de force proximale généré au cours du service augmente avec l'âge des joueurs et le pic de force antérieure a également tendance à augmenter ($P = 0,057$) (Tableau 5.5). Ces résultats suggèrent que les joueurs plus âgés ont un risque plus important de développer des lésions du labrum glénoïdien (Fleisig et al., 1999; Martin et al., 2014). De plus, le risque de blessures de la coiffe des rotateurs est associé dans la littérature à une augmentation du pic de moment d'abduction horizontale de l'épaule, qui est identique entre nos 3 groupes, mais aussi à l'augmentation du pic de force proximale de l'épaule (Fleisig et al., 1999). Par conséquent, les joueurs +16G pourraient aussi être exposés à un risque plus important de développer ce type de pathologies. Durant la phase de décélération du service, les joueurs +16G génèrent également un pic de force inférieure plus élevé que les plus jeunes joueurs (Tableau 5.5). L'augmentation de cette force à l'épaule peut favoriser la translation de la tête humérale et entraîner un conflit externe entre le tendon du biceps, les muscles de la coiffe des rotateurs ou la grande tubérosité de l'humérus d'un côté, et la partie inférieure de l'acromion ou le

ligament coraco-acromial de l'autre (Fleisig et al., 1995; Lädermann et al., 2016). Par conséquent, l'ensemble de ces résultats suggère un risque de blessures à l'épaule plus important pour les joueurs +16G. Toutefois, ce risque plus élevé reste avant tout théorique dans la mesure où celui-ci dépend du niveau des contraintes articulaires mais aussi de la capacité des tissus à résister à ces contraintes. En effet, le niveau de contraintes articulaires jugé « à risque » peut varier entre les groupes en raison de la différence de masse musculaire, de force des tissus et de résistance des tendons (Fleisig et al., 1999). La puberté est une période qui se traduit par un déséquilibre important entre la force musculaire et la résistance des tendons (DiFiori et al., 2014; Mersmann et al., 2017). Chez les garçons, les principaux changements physiques et anatomiques liés à la puberté interviennent le plus souvent entre 13 et 16 ans (Malina et al., 2004). Nos résultats épidémiologiques montrent que les blessures à l'épaule ont concerné 50 % des U16G et 25 % des U14G, contre 10 % des +16G (Figure 5.7). L'ensemble de ces résultats nous laisse supposer que les U14G et surtout les U16G sont dans une phase de fragilité liée à la puberté qui pourrait les exposer à une vulnérabilité plus importante concernant les blessures à l'épaule. Pour confirmer cette hypothèse, de futures investigations devront être menées afin d'explorer plus précisément la relation entre l'âge, le niveau de contraintes articulaires subi au cours du service et le risque de blessures du membre supérieur. Ces investigations pourraient permettre d'identifier un niveau de contraintes articulaires « critique » en fonction de la catégorie d'âge.

Au niveau du coude, l'augmentation du pic de force proximale avec l'âge (Tableau 5.5) nous laisse penser que le risque de lésions chondrales ou ostéochondrales au niveau de la tête radiale ou du capitulum huméral est plus important pour les joueurs +16G (Cain et al., 2003; Eygendaal et al., 2007). L'augmentation significative du pic de force médiale observée chez ces mêmes joueurs pourrait augmenter leur risque de développer une blessure ulno-humérale (Fleisig et Escamilia, 1996). Par ailleurs, la valeur maximale du moment de varus au coude est indépendante de l'âge des joueurs (Tableau 5.5), ce qui signifierait que le risque de tendinopathies du ligament collatéral ulnaire est identique entre les 3 groupes (Cain et al., 2003; Eygendaal et al., 2007). Nos résultats épidémiologiques montrent une augmentation progressive du pourcentage de joueurs blessés au coude au travers des catégories d'âge (10 % en U14G et 30 % en +16G) (Figure 5.7). Par conséquent, les données dynamiques et épidémiologiques de notre étude suggèrent que le risque de blessure au coude pourrait augmenter avec l'âge chez les garçons.

Enfin, au niveau du poignet, les contraintes liées à la répétition du service peuvent être à l'origine de ténosynovite, de lésions du complexe triangulaire fibro-cartilagineux ou de tendinopathies des fléchisseurs et des extenseurs ulnaires du carpe (Parmelee-Peters et Eathorne, 2005). Nos résultats montrent une augmentation avec l'âge des pics de forces médiale et proximale ($P = 0,057$) générés au cours du service (Tableau 5.5). Concernant notre recueil épidémiologique, aucun joueur U14G n'a rapporté de blessures au poignet au cours de l'année précédant l'expérimentation, alors que c'est le cas de 25 % des U16G et 20 % des +16G (Figure 5.7). De nouveau, nos résultats laissent supposer que les joueurs plus âgés encourent un risque de blessures au poignet plus élevé que les joueurs U14G.

5.4.2.3.2 Chez les filles

Le pic de force antérieure au coude est le seul paramètre dynamique qui augmente significativement avec l'âge des joueuses (Tableau 5.8), mais cette force n'a pas été associée dans la littérature avec l'apparition d'une pathologie spécifique (Fleisig et Escamilia, 1996). Dans l'ensemble, nos résultats montrent que les contraintes articulaires à l'épaule, au coude et

au poignet ne sont pas influencées par l'âge (Tableau 5.8) ce qui suggère un risque de blessures du membre supérieur identique entre les joueuses des 3 groupes. Ce risque pourrait même être plus élevé chez les joueuses U14F si l'on suppose une période de fragilité liée à la puberté, avec un pic de croissance qui s'observe en moyenne autour de 11,5 ans et une maturation osseuse qui s'achève en moyenne autour de 13,3 ans (Barber-Westin et al., 2006). Notre recueil épidémiologique ne semble pas aller dans ce sens concernant les blessures à l'épaule et au poignet puisque la proportion de joueuses blessées à ces deux articulations augmente avec l'âge (Figure 5.7). Toutefois, ces résultats ne sont pas significatifs. À l'inverse, les joueuses U14F ont été plus nombreuses en proportion à se blesser au niveau du coude (29 % des joueuses) par rapport aux joueuses plus âgées (entre 6 et 8 % des joueuses) ($P = 0,292$) (Figure 5.7). Sans occulter la taille du groupe U14F ($n = 7$), ces observations interpellent et invitent à poursuivre ces investigations pour explorer plus en profondeur la relation entre l'âge, le niveau de contraintes articulaires subi au cours du service et le risque de blessures du membre supérieur.

5.4.3 Influence du sexe sur la biomécanique du service

5.4.3.1 Influence du sexe sur la vitesse de balle

Nos résultats sont en accord avec la littérature et révèlent que dès l'âge de 12 ans, la vitesse de balle est significativement supérieure chez les garçons par rapport aux filles (Tableau 5.9, 5.10 et 5.11) (Fernandez-Fernandez et al., 2014; Ulbricht et al., 2016; Vaverka et al., 2018). Dès l'enfance, les garçons atteignent des performances supérieures dans les activités de lancer, et les raisons envisagées sont d'ordre anatomique, physiologique ou encore environnemental (Lombardo et Deaner, 2018). Pour la catégorie U12, la fédération allemande de tennis a mis en évidence que le service est en moyenne $10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ plus rapide chez les garçons (Fernandez-Fernandez et al., 2014). Nos résultats démontrent un déficit de vitesse de balle pour les joueuses de l'ordre de 9 % pour le groupe U14F, 11 % pour le groupe U16F et 17 % pour le groupe +16F. À l'âge adulte, la vitesse de balle des joueuses professionnelles représente classiquement 85 % de celle des joueurs professionnels (Vaverka et al., 2018). À partir du moment où les garçons commencent leur puberté (autour de 13 ans), leurs performances dépassent celles des filles dans les actions qui demandent des qualités de force ou de vitesse (Handelsman, 2017). Plusieurs éléments sont avancés dans la littérature pour expliquer ces différences : la taille et la force musculaire étant les deux raisons les plus souvent mises en avant (Pluim, 1999). La taille est significativement supérieure chez les garçons à partir de 14 ans. En revanche, le niveau de force supérieur pour nos groupes de garçons reste supposé puisque cette mesure n'a pas été entreprise dans notre étude, ce qui constitue une perspective de ce travail de thèse.

5.4.3.2 Influence du sexe sur les variables cinématiques du service

Afin d'individualiser plus efficacement les contenus d'entraînement au cours de la formation, une problématique importante pour les entraîneurs est de comprendre les différences techniques existantes entre le service masculin et le service féminin. D'après certains entraîneurs, le manque d'explosivité de la poussée des jambes est un défaut technique plus fréquemment observé chez les filles (Genevois, 2014; Renoult, 2007). Nos résultats ne supportent pas cette hypothèse de terrain puisque quel que soit l'âge considéré, la vitesse verticale maximale des hanches est identique entre les garçons et les filles (Tableau 5.9, Tableau 5.10 et Tableau 5.11). Pour les moins de 14 ans, ce résultat semble plutôt logique puisque

Barber-Westin et al. (2006) n'ont pas montré de différence dans la force isocinétique de flexion et d'extension des membres inférieurs entre les deux sexes. En revanche, à partir de 14 ans, les garçons présentent des niveaux de force supérieurs par rapport aux filles (Barber-Westin et al., 2006). Dans la littérature, Whiteside et al. (2013) ont déjà suggéré que pour les joueuses professionnelles, la poussée des jambes au service ne correspond pas à un effort maximal des membres inférieurs. Nous pouvons émettre la même hypothèse pour les U16G et +16G dans la mesure où, avec des niveaux de force théoriquement supérieurs, ils produisent une poussée des jambes comparable à celle des joueuses U16F et +16F.

En U14, malgré une vitesse verticale des hanches identique entre les deux sexes, la hauteur d'impact relative à la taille est significativement supérieure pour les garçons (Tableau 5.9). Ces derniers ont tendance à avoir une inclinaison latérale du tronc plus importante au moment de l'impact ($56 \pm 10^\circ$ pour les U14G vs. $47 \pm 13^\circ$ pour les U14F, $P = 0,096$), ce qui laisse penser à un meilleur passage de l'épaule dominante vers le haut, et donc une hauteur de frappe optimisée par rapport aux filles. Cette différence dans l'inclinaison latérale du tronc pourrait avoir un lien avec la position latérale de l'impact, qui tend à être légèrement « plus à gauche » chez les garçons (Tableau 5.9). Parallèlement, plusieurs études ont suggéré une optimisation de la rotation interne de l'épaule avec un impact de balle « plus à gauche » ou avec une augmentation de l'inclinaison latérale du tronc à l'impact (Chow et al., 2003; Elliott, 2006; Whiteside et al., 2013). Nos résultats sont en accord avec ces études et montrent que la vitesse de rotation interne de l'épaule est significativement supérieure chez les garçons (Tableau 5.9). Dans la mesure où cette vitesse segmentaire contribue très fortement à la vitesse de la raquette à l'impact (Elliott et al., 1995), ce résultat semble être l'une des raisons pour lesquelles les U14G ont une vitesse de service significativement supérieure à celle des U14F ($+13 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) (Tableau 5.9). Une autre différence entre les services masculin et féminin avant 14 ans concerne l'inclinaison latérale maximale du tronc au cours de la phase d'armé (Figure 5.12). Cette inclinaison latérale du tronc, qui décrit la bascule de l'épaule dominante vers le bas après le lancer de balle, est une caractéristique spécifique du service des joueurs élités (Reid et al., 2008). Nos résultats montrent que les U14G augmentent significativement l'inclinaison latérale de leur tronc au cours de la phase d'armé par rapport aux U14F (Tableau 5.9). D'après Bahamonde (2000), cette organisation facilite la création du moment cinétique autour de l'axe antéropostérieur, qui est un facteur déterminant pour produire une vitesse de balle élevée au service. Des investigations supplémentaires sont nécessaires pour déterminer si la différence d'inclinaison latérale maximale du tronc entre garçons et filles joue un rôle sur la différence de vitesse de balle observée à cet âge, d'autant que la vitesse maximale de rotation antéropostérieure du tronc est identique entre les deux sexes (Tableau 5.9). Enfin, la descente de la raquette ne s'opère pas de la même façon chez les garçons et chez les filles. En effet, l'angle de la raquette mesuré au milieu de la descente dans le dos décrit un tamis plus ouvert pour les garçons, et donc à priori l'utilisation d'un service en plateau (Smith, 2004; Williams et Petersen, 2000). **Ces résultats renforcent l'intérêt de l'étude 3 de ce travail, qui aura pour objectif de déterminer l'influence du service en plateau chez les jeunes garçons.**



Figure 5.12 – Représentation de l’inclinaison latérale maximale du tronc chez un joueur professionnel, d’après Kovacs et Ellenbecker (2011).

Pour les U16G, la vitesse de rotation interne de l’épaule reste supérieure et la position de l’impact est toujours « plus à gauche » par rapport au U16F, mais ces résultats ne sont pas significatifs (Tableau 5.10). En revanche, les garçons démontrent une vitesse maximale de flexion du poignet significativement supérieure à celle des filles. Les joueurs sont plus grands que les joueuses (+ 8 cm), ce qui les amène à avoir une hauteur d’impact plus élevée ($2,63 \pm 0,13$ m vs. $2,47 \pm 0,10$ m) (Figure 5.2 et Figure 5.5). Par conséquent, ils doivent produire une trajectoire de balle plus tendue (plus vers le bas) qui nécessite une action de flexion du poignet plus importante pour diriger correctement la raquette (raquette davantage dirigée vers le bas à l’impact) (Whiteside et al., 2013).

Enfin, en +16, les vitesses maximales de rotation interne de l’épaule ($P = 0,064$) et de flexion du poignet ($P < 0,01$) sont toujours supérieures chez les garçons. Par rapport à la catégorie d’âge inférieure, une différence entre les deux sexes est également retrouvée concernant la vitesse maximale d’extension du coude, qui est significativement plus rapide chez les garçons (Tableau 5.11). L’extension du coude est produite passivement par la force centrifuge de la rotation des épaules, et surtout activement par l’action du muscle triceps brachial (Chu et al., 2009). Dans la mesure où les vitesses de rotation du tronc ne sont pas différentes entre les deux sexes, ce résultat pourrait être le reflet d’un niveau de force du triceps brachial supérieur pour les garçons. Une autre différence entre les deux sexes concerne la position de l’impact de balle, celle-ci étant significativement plus avancée et plus « sur la gauche » pour les garçons (Tableau 5.11). Les entraîneurs attachent généralement beaucoup d’importance à la forme du lancer de balle et à la position de l’impact qui en découle, et ces informations peuvent être précieuses dans la différenciation des consignes à donner aux joueurs et aux joueuses. Toutefois, il faut souligner que ces résultats contrastent avec ceux de Chow et al. (2003) qui ont rapporté une position latérale et antéropostérieure de l’impact très comparable entre des joueurs et des joueuses professionnelles.

D’une manière générale, nos résultats mettent en avant de nombreux points techniques communs entre les services masculin et féminin. Ils montrent également quelques différences qui peuvent se résumer ainsi : une inclinaison latérale maximale du tronc plus prononcée et un service en « plateau » chez les garçons de 12 – 13 ans, une position d’impact qui se différencie

peu à peu avec l'âge, et une différence de plus en plus marquée de l'action du membre supérieur à l'avantage des garçons.

5.4.4 Résultats préliminaires

En parallèle de cette étude, nous avons mené conjointement une analyse électromyographique (EMG) de la 1^{ère} balle de service, et une analyse cinématique et dynamique de la 2^{nde} balle de service. Ces deux sujets de recherche, qui n'ont jamais été abordés pour le service des jeunes joueurs élites, nécessitent toutefois un travail de thèse à part entière pour être explorés dans leur intégralité. Nous apportons ici des résultats préliminaires qui visent à fournir un support initial et des pistes de réflexion quant à la réalisation de ces futurs travaux.

5.4.4.1 L'analyse électromyographique

L'électromyographie (EMG) de surface est une méthode d'analyse non-invasive qui permet de mesurer l'activité électrique des muscles lors d'un mouvement sportif grâce à des électrodes posées sur la peau (van den Bogert, 1994). Lorsqu'elle est couplée à l'analyse cinématique et dynamique du mouvement, l'analyse EMG peut fournir un éclairage sur le mécanisme des blessures (Chow et al., 2009; Escamilia et Andrews, 2009; Kibler et al., 2007; Seeley et al., 2008). D'une part, l'EMG apporte des informations sur la coordination musculaire mise en jeu au cours du mouvement (Kibler et al., 2007), ce qui peut permettre d'identifier les séquences d'activations musculaires « anormales » qui conduisent à la réalisation d'un geste traumatisant. Par exemple, le muscle grand dentelé joue un rôle de stabilisateur de la scapula au cours de la phase d'armé du service, et un défaut d'activation de ce muscle au cours de cette phase peut suggérer une stabilisation insuffisante de la scapula sur le thorax et donc une augmentation du risque de blessures à l'épaule (Escamilia et Andrews, 2009). D'autre part, l'EMG permet d'enregistrer l'intensité des activations musculaires, et certains auteurs estiment qu'une activation musculaire « élevée » ou « trop élevée » peut être le reflet de contraintes excessives appliquées sur les différentes structures anatomiques (Chow et al., 2009). Par conséquent, notre objectif principal était de construire une base de données EMG sur le service des jeunes joueurs élites, pour ensuite être en mesure d'identifier les intensités ou les séquences d'activations musculaires « anormales » et potentiellement traumatisantes pour le jeune joueur. À cette fin, la méthodologie revient à enregistrer le niveau d'activation d'un muscle lors d'un exercice de contraction maximale volontaire isométrique, puis à utiliser cette valeur d'activation maximale « théorique » pour normaliser le niveau d'activation musculaire au cours du mouvement (Annexe 1) (Chow et al., 2009; Morris et al., 1989; Ryu et al., 1988; Seeley et al., 2008). En fonction de ce rapport, l'activation musculaire est considérée comme minime ou faible (0 à 30 %), modérée (31 à 59 %) ou élevée (plus de 60 %) (Ryu et al., 1988).

Nos résultats préliminaires pour les joueurs et les joueuses âgés de 12 à 16 ans sont présentés en annexe de ce travail (Annexe 5). Tout d'abord, les moyennes d'activation musculaire mesurées au cours de la phase de préparation du service sont relativement faibles (entre 2 et 21 % de la contraction maximale volontaire isométrique). Cette phase, peu sollicitante au niveau musculaire, est une phase durant laquelle l'entraîneur demande souvent au joueur de « trouver du relâchement » pour réaliser l'élévation des deux bras. Au cours de la phase d'armé, l'abduction, l'abduction horizontale et la rotation externe de l'épaule nécessitent une activation plus importante du deltoïde antérieur, du trapèze moyen, du grand dentelé et du sous-épineux (24 à 40 %) (Escamilia et Andrews, 2009). L'oblique interne controlatéral, qui

participe entre autres à la rotation longitudinale du tronc (Maquirriain et al., 2007), est fortement activé durant cette phase (49 à 70 %). Nos résultats préliminaires montrent que la phase d'accélération est ensuite une phase relativement sollicitante pour les muscles de l'épaule et du tronc. Une contraction puissante du triceps brachial (59 à 71 %) conduit à l'extension rapide de l'avant-bras vers le haut et vers l'avant. Conjointement, le grand dorsal (55 à 63 %) et le grand pectoral (47 à 49 %) se contractent fortement pour générer une vitesse de rotation interne élevée. Le grand dentelé (62 à 72 %) permet quant à lui l'abduction du bras et la stabilisation de la scapula. Tous les muscles du tronc ont une activation modérée ou élevée au cours de cette phase. Les grands droits (55 à 84 %) et les obliques internes (65 à 116 %) sont les muscles pour lesquels l'activation électrique mesurée est la plus élevée. Après l'impact, le sous-épineux, le trapèze, le deltoïde antérieur et le grand dentelé gardent une activation modérée pour participer à la décélération du bras (35 à 45 %) tandis que les érecteurs du rachis (44 à 62 %) participent au freinage et au rééquilibrage du tronc.

Nos résultats préliminaires montrent une séquence d'activation musculaire globalement identique entre les joueurs et les joueuses, et cette séquence correspond à celle retrouvée lors du service de joueurs adultes (Chow et al., 2009; Kibler et al., 2007; Ryu et al., 1988; Seeley et al., 2008). Toutefois, quelques éléments attirent notre attention et méritent d'être soulignés. D'une part, nos résultats préliminaires laissent apparaître une activation maximale similaire entre le grand droit dominant et le grand droit non-dominant. Chow et al. (2009) ont montré que le grand droit non-dominant est plus fortement activé au cours de la phase d'accélération du service de joueurs élités (92 % contre 56 % pour le grand droit dominant), mais ce résultat n'a pas été confirmé pour des joueurs de niveau intermédiaire (respectivement 47 et 59 %). L'exploration de cet élément méritera d'être approfondie dans une prochaine étude, d'autant que cela va à l'encontre des données que nous avons recueillies sur les blessures. En effet, nous avons enregistré 11 blessures du grand droit non-dominant pour les joueurs et les joueuses de moins de 16 ans pour seulement une blessure du grand droit dominant. D'autre part, nos résultats semblent faire émerger l'idée que l'intensité des activations musculaires est plus forte chez les joueurs que chez les joueuses. Si cette observation amène à penser que le service masculin est un mouvement plus violent que son équivalent féminin, elle est aussi à interpréter avec beaucoup de précaution. En effet, Sánchez-Muñoz et al. (2007) ont montré que la composition corporelle (masse musculaire, masse grasse) est différente entre les jeunes joueurs et les jeunes joueuses élités, et cet élément joue un rôle sur la qualité du signal EMG enregistré (De Luca, 1997). D'une manière générale, les résultats de l'analyse EMG sont dépendants des procédures d'enregistrement et sont très variables d'un individu à l'autre (Girard et al., 2005; Pincivero et al., 2000), comme en témoigne la dispersion de nos résultats EMG (Annexe 5).

5.4.4.2 La seconde balle de service

Dans le cadre de ce travail de thèse et dans l'optique de l'optimisation de la performance au service, nous avons rédigé un compte-rendu biomécanique pour chaque joueur et chaque joueuse impliqué dans cette étude (Annexe 1). Afin de fournir un maximum d'informations aux entraîneurs, nous nous sommes également intéressés à la 2nde balle de service. Le 2nd service a reçu beaucoup moins d'attention que le 1^{er} service dans la littérature scientifique (Abrams et al., 2014; Chow et al., 2003; Reid, Elliott et Alderson, 2007; Sakurai et al., 2013; Sheets et al., 2011). Si les joueurs et les joueuses élités peuvent avoir recours à tous les types de 2nd service au cours d'un même match, il est admis que l'effet lifté est surtout utilisé dans le jeu masculin et l'effet slicé dans le jeu féminin (Antoun, 2007; Gillet et al., 2009; Sheets et al., 2011). Pour cette raison, nous nous arrêterons à une présentation des résultats préliminaires de la 2nde balle liftée pour les joueurs et de la 2nde balle slicée pour les joueuses (Annexe 6).

Aucune étude ne fournit de données sur la vitesse du service lifté ou du service slicé chez les jeunes joueurs élites. Nos résultats préliminaires permettent d'appréhender ces vitesses et montrent que celles-ci augmentent avec l'âge pour les deux sexes (U14G : $118 \pm 10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, U16G : $132 \pm 8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, +16G : $141 \pm 17 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ pour le service lifté ; U14F : $119 \pm 7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, U16F : $126 \pm 8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, +16F : $135 \pm 10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ pour le service slicé). Par ailleurs, si le trajet de la raquette avant l'impact est nécessairement modifié pour pouvoir imprimer un effet lifté ou slicé, la vitesse maximale absolue de la raquette avant l'impact est relativement constante entre tous les types chez les joueurs adultes élites (Chow et al., 2003; Sheets et al., 2011). Nous retrouvons ce type de résultats pour les groupes +16G et +16F, avec une diminution de la vitesse de la raquette de l'ordre de 6 % sur le service lifté et de 2 % sur le service slicé par rapport au 1^{er} service à plat. Cette diminution est légèrement plus prononcée pour le 2nd service des groupes U14G (8 %) et U14F (5 %), ce qui décrit un engagement inférieur et probablement une technique encore perfectible sur ce type de service.

5.4.4.2.1 Le second service lifté chez les garçons

L'analyse cinématique du service lifté montre une organisation technique différente par rapport au 1^{er} service à plat. L'angle formé entre la ligne des hanches et le filet au début de la poussée des jambes augmente avec le service lifté (entre 8 et 13°) et témoigne d'une position davantage « tournée » sur ce type de service. En accord avec les travaux de Reid, Elliott et Alderson (2007), l'explosivité de la poussée des jambes augmente par rapport au 1^{er} service à plat quel que soit l'âge des joueurs. Par conséquent, ces résultats confirment que la poussée des jambes ne constitue pas un effort « maximal » mais plutôt un effort « optimal » sur le 1^{er} service (Whiteside et al., 2013). En revanche, la poussée des jambes plus explosive sur le 2nd service ne permet pas d'augmenter les vitesses maximales de rotation du tronc et du membre supérieur. Un résultat préliminaire intéressant semble montrer que la descente de la raquette dans le dos s'opère de manière différente avec une raquette davantage « perpendiculaire au sol » sur le service lifté par rapport au service à plat, ce qui pourrait définir un critère de performance sur ce type de service. De plus, alors que les vitesses maximales d'extension des chevilles et des genoux sont globalement augmentées sur le service lifté, toutes les vitesses segmentaires mesurées au niveau du tronc et du membre supérieur diminuent avec ce type de service.

Pour optimiser la quantité d'effet lifté, la position de l'impact de balle est plus « à gauche » (entre 24 et 40 cm pour un joueur droitier) et moins « vers l'avant » (environ 20 cm) par rapport au service à plat, ce qui est en accord avec la littérature sur le 2nd service des joueurs adultes (Carboch et Süß, 2015; Sheets et al., 2011). Cette modification aboutit à une position avec un tronc beaucoup plus incliné au moment de l'impact de balle (Figure 5.13).

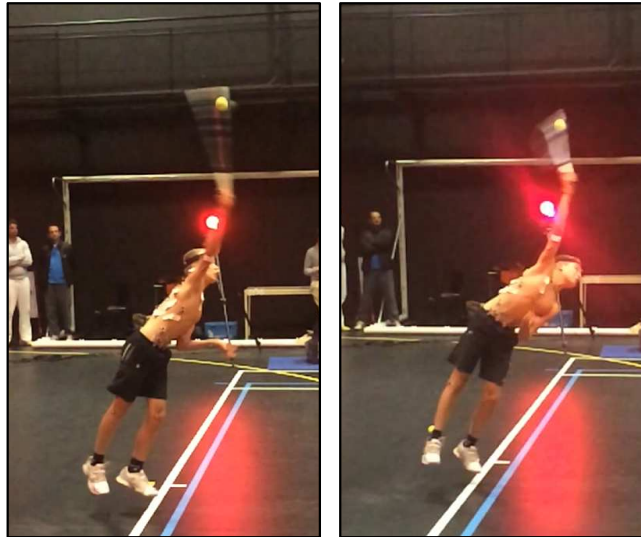


Figure 5.13 – Impact de balle sur un 1^{er} service à plat (à gauche) et sur un 2nd service lifté (à droite) pour un joueur de 12 ans.

5.4.4.2.2 Le second service slicé chez les filles

Pour le 2nd service slicé, nos résultats préliminaires laissent entrevoir chez les joueuses une organisation technique très similaire avec le 1^{er} service à plat. Quel que soit l'âge, les joueuses procèdent à un vissage des épaules par rapport aux hanches identique entre les deux types de service (angle de séparation maximal), ce qui signifie que les joueuses U14F ont aussi un vissage des épaules relativement important sur le service slicé. La principale différence concerne la vitesse maximale de flexion du poignet qui est inférieure sur le service slicé par rapport au service à plat (entre 110 et 180 °·s⁻¹). Nous supposons que la vitesse de pronation de l'avant-bras est également plus faible sur ce type de service, et cette vitesse devra être quantifiée dans une prochaine étude. Pour le groupe +16F, toutes les autres vitesses segmentaires sont identiques entre les 1^{er} et 2nd services. En revanche, pour le groupe U14F, les vitesses maximales de rotation antéropostérieure du tronc et de rotation interne de l'épaule diminuent assez nettement pour le service slicé. Ces observations seront à approfondir et pourraient permettre de fournir aux entraîneurs des orientations techniques précises pour optimiser le service slicé des joueuses de 12 – 13 ans. Par ailleurs, nos résultats préliminaires ne montrent qu'une très légère modification de la position de l'impact entre le service à plat et le service slicé. Dans la pratique, les entraîneurs encouragent souvent à frapper la balle plus « à droite » pour augmenter la quantité d'effet slicé. Nos résultats préliminaires pourraient indiquer que les joueuses élites sont plutôt dans une logique de masquer leurs intentions tactiques en adoptant un lancer de balle et une position de frappe très similaires entre le service à plat et le service slicé.

5.4.4.2.3 Influence des services lifté et slicé sur les risques de blessures

L'objectif d'une prochaine investigation sera d'explorer très précisément les risques de blessure associés à chaque type de service. Au niveau du membre supérieur, Abrams et al. (2014) ont souligné que le service lifté entraîne des forces supérieures sur la partie postérieure de l'épaule. Ces résultats sont en contradiction avec ceux de Reid, Elliott et Alderson, (2007) qui n'ont pas rapporté de différence pour les contraintes maximales à l'épaule entre le service lifté et le service à plat. Pour les joueurs de 12 à 16 ans, nos résultats préliminaires révèlent des

valeurs de contraintes globalement supérieures lors du 1^{er} service à plat. Néanmoins, le pic de moment d'abduction horizontale au cours de la phase de décélération du bras est plus élevé lors du service lifté, ce qui suggère un risque de blessures de la coiffe des rotateurs plus important pour ce type de service.

À l'inverse, le service slicé est décrit comme le service le moins traumatisant pour le membre supérieur (Abrams et al., 2014). Nos résultats préliminaires confortent cette idée dans la mesure où les contraintes au coude et à l'épaule apparaissent moins élevées que lors du 1^{er} service à plat, surtout pour les plus jeunes joueuses. Par conséquent, le service slicé constitue vraisemblablement le type de service à réintégrer en premier lors de la reprise de l'entraînement après une blessure du membre supérieur (Abrams et al., 2014).

Au niveau du tronc, le service lifté est souvent considéré comme un service traumatisant pour le joueur de tennis (Sheets et al., 2011). Ce type de service implique une augmentation des vitesses linéaires verticale et latérale de la raquette et une frappe de balle « plus à gauche » (pour un joueur droitier) que pour les services à plat et slicés (Abrams et al., 2011; Carboch et Süß, 2015; Sheets et al., 2011). Ces éléments peuvent amener le joueur, au moment de la phase d'armé, à accentuer l'extension de son tronc et à réaliser un geste potentiellement plus traumatisant. En effet, Abrams et al. (2014) ont enregistré des forces et des moments de forces supérieurs au niveau du dos lors de la phase d'armé du service lifté. Ces résultats laissent supposer une sollicitation plus importante des muscles du tronc (érecteurs du rachis, grand droit controlatéral, obliques interne et externe) et des contraintes supérieures sur les différentes structures de la colonne vertébrale (ligaments, vertèbres et disques vertébraux) (Abrams et al., 2011). De notre point de vue, l'analyse EMG pourrait constituer une solution intéressante pour comparer les risques de blessures entre le 1^{er} service et le 2nd service. Comme discuté précédemment, les données EMG sont très variables d'un joueur à l'autre et dépendent largement des procédures d'enregistrement (pose de l'électrode en particulier). Toutefois, il nous semble que ces limites sont en partie contournées lorsque l'analyse concerne une comparaison de données EMG mesurées pour différentes conditions chez un même joueur (1^{er} et 2nd services).

5.4.4.2.4 Perspectives et réflexion méthodologique

De notre point de vue, une réflexion méthodologique devra être menée pour poursuivre l'analyse du 2nd service. Si la précision de la frappe et la régularité constituent évidemment des critères de performance pour le 1^{er} service, la vitesse de balle reste l'élément essentiel pour dominer l'adversaire. En conséquence, l'analyse de la vitesse de balle pour objectiver la performance du 1^{er} service est pertinente et en accord avec la littérature scientifique (Blackwell et Knudson, 2002; Chow et al., 2003; Elliott et al., 1995, 2003; Fleisig et al., 2003; Girard et al., 2007; Gordon et Dapena, 2006; Martin, Kulpa, Delamarche et Bideau, 2013; Sprigings et al., 1994). Toutefois, la performance sur le 2nd service ne s'envisage pas tout à fait de la même manière, et un protocole plus spécifique et plus conforme aux conditions de match devra être étudié. D'une part, en lien avec la logique du jeu (double faute), la régularité est un facteur beaucoup plus important pour le 2nd service et celui-ci devra être pris en compte dans le protocole d'étude. D'autre part, l'augmentation de la quantité de rotation de la balle permet d'optimiser la sécurité du service et de complexifier le retour pour l'adversaire (Sheets et al., 2011; Vaverka et Cernosek, 2013). En contrepartie, cette augmentation tend à réduire la vitesse de balle (Sakurai et al., 2013). Dès lors, la performance sur le 2nd service ne peut plus être envisagée au seul regard de la vitesse de balle. À l'inverse de l'étude de Sakurai et al. (2013), nous avons fait le choix de ne pas mettre de marqueurs réfléchissants sur la balle pour ne pas

perturber les sensations des joueurs, en particulier au moment de l'impact. De ce fait, nous ne n'avons pas été en mesure de quantifier la rotation de la balle. L'utilisation d'un système type Hawk-Eye (Hawk-Eye Innovations Ltd.), qui permet cette quantification sans perturber le joueur dans la réalisation du mouvement, constitue une piste intéressante pour parvenir à ses fins.

5.4.5 Limites et perspectives

Cette étude nous a permis de mieux comprendre, d'une part, l'évolution de la biomécanique du service chez les garçons et chez les filles entre 12 ans et l'âge adulte et, d'autre part, les principales différences biomécaniques entre les services masculin et féminin. Elle possède néanmoins plusieurs limites mais offre aussi diverses perspectives qu'il convient de mentionner. Tout d'abord, l'utilisation de marqueurs réfléchissants pourrait conduire à des approximations dans l'analyse d'un mouvement rapide comme le service (glissement sur la peau), ou pourrait perturber le joueur et donc provoquer des changements dans la mécanique du geste (Abrams et al., 2011). Nous avons été particulièrement vigilants sur ce dernier point et aucun sujet n'a rapporté une quelconque gêne au moment de servir.

Dans un futur travail, davantage de garçons âgés de 16 à 20 ans devront être recrutés pour décrire l'évolution de la biomécanique du service et ses liens avec la performance entre la fin de l'adolescence et le début de la carrière professionnelle. Il conviendra surtout d'étendre notre analyse à des joueurs et des joueuses âgés de 8 à 11 ans, puisque nos résultats laissent supposer que les principaux changements cinématiques du service interviennent pour les deux sexes avant l'âge de 12 ans. En outre, l'analyse dynamique du service de ces plus jeunes joueurs, couplée à un recueil de blessures, fournirait des informations précieuses quant aux timings de mise en place des stratégies de prévention des blessures du membre supérieur. Dans notre étude, nous nous sommes intéressés à l'évolution de la biomécanique du service en prenant en compte l'âge chronologique de chaque sujet. L'évaluation de l'âge biologique permettra dans une prochaine étude d'approfondir l'interprétation des résultats en fonction du développement physique des joueurs et des joueuses (Baxter-Jones et al., 2005; Lloyd et al., 2014).

Concernant le recueil des blessures, l'utilisation de questionnaires remplis par un jeune joueur ou par son entraîneur peut engendrer un manque de précision des données ou des oublis (Krosshaug et al., 2005). Pour minimiser ce biais, nous avons uniquement enregistré les blessures subies au cours de l'année précédant la capture de mouvement.

Pour améliorer l'interprétation du lien entre la survenue d'une blessure chronique, la technique de service et les contraintes articulaires mesurées lors du mouvement, de futures recherches devront mettre en place un suivi longitudinal des blessures et des analyses biomécaniques répétées. Toutefois, la mise en place de ce type d'investigation reste relativement complexe au regard des nombreuses contraintes liées à notre population d'étude : programmation très individualisée, nombreux tournois à l'étranger, lieux et conditions d'entraînement différents, accès ou non à un suivi médical régulier, etc.

Dans le même ordre d'idée, l'investigation de la 2nde balle de service devra être poursuivie, notamment celle du service lifté qui semble être un mouvement à la fois plus complexe à réaliser et plus traumatisant pour le tronc. L'analyse de la performance du 2nd service impliquera de quantifier la rotation de la balle à l'aide d'un système d'analyse vidéo

type Hawk-eye (Hawk-Eye Innovations Ltd.). Pour le service lifté, une analyse approfondie de la cinématique et de la dynamique de la région lombaire serait pertinente et pourrait être réalisée grâce à un ajout de marqueurs au niveau de cette région (Campbell et al., 2013).

Enfin, dans la mesure où nous nous sommes uniquement intéressés aux meilleurs joueurs et joueuses français, nous avons la conviction que de nombreux paramètres cinématiques décrits dans cette étude correspondent à des fondamentaux techniques qui caractérisent le service des joueurs et des joueuses de haut niveau. Toutefois, plusieurs facteurs biomécaniques diffèrent plus ou moins fortement entre les joueurs, et nous supposons que certaines de ces différences sont plutôt le reflet des préférences motrices naturelles que de la maîtrise technique de chaque individu. Par exemple, chaque joueur possède une main dominante et un œil préférentiel pour viser (œil directeur) (Figure 5.14) (Mavvidis et al., 2018). Nous émettons l'hypothèse que ces deux éléments jouent un rôle sur la forme du lancer de balle au service, et par conséquent sur l'organisation technique jusqu'à la frappe de balle (position de l'impact de balle, position du tronc et du membre supérieur à l'impact). L'étude des liens entre les préférences motrices naturelles et la technique de service devra être menée dans un futur travail.



Figure 5.14 – Représentation de deux joueurs professionnels droitiers, l'un avec l'œil directeur droit (joueur dit « homogène », à gauche) et l'autre avec l'œil directeur gauche (joueur dit « croisé », à droite), d'après Mavvidis et al. (2018).

5.4.6 Recommandations pratiques aux entraîneurs et aux joueurs

Dans la littérature, la vitesse de balle est considérée comme un élément essentiel de la performance au service (Cross et Pollard, 2009; Haake et al., 2000; O'Donoghue et Ballantyne, 2004; Takahashi et al., 2006; Ulbricht et al., 2016; Whiteside et Reid, 2017). Bien que cette idée soit largement partagée par les entraîneurs, nous estimons que l'analyse de la vitesse de balle est en réalité sous-exploitée dans le cadre de l'entraînement au service. Plutôt que de mesurer objectivement la vitesse du service grâce à un radar, les entraîneurs préfèrent se fier à leur « œil » pour estimer ce paramètre ou bien s'intéresser aux conséquences « statistiques » du

service par rapport au gain du point ou à l'avantage pris dans l'échange. Pourtant, Moran et al. (2012) ont récemment démontré l'avantage d'utiliser un radar lors des entraînements dédiés à l'optimisation du service. En effet, ils ont rapporté que des jeunes joueurs de niveau national ($15,7 \pm 1,6$ ans) ayant eu pendant 6 semaines un retour direct de leur performance au service grâce à un radar ont significativement augmenté la vitesse de leur service par rapport à un groupe témoin qui n'a pas eu accès à ces informations. Toutefois, nous sommes conscients que l'évaluation précise du niveau d'un joueur via la mesure de la vitesse du service demeure complexe puisque les entraîneurs n'ont que très peu de données pour comparer les performances au cours de la formation. Bien souvent, seule la vitesse du service des joueurs professionnels sert de point de repère et constitue un objectif à atteindre sur une vision d'optimisation de la performance à long terme. Afin de fournir aux entraîneurs un outil d'évaluation précis et une idée des « temps de passage » des jeunes joueurs et joueuses de niveau national entre 12 et 16 ans, les vitesses obtenues par année d'âge pour le 1^{er} service à plat et pour le 2nd service à effet sont présentées sur les Figure 5.15 et Figure 5.16. En lien avec les résultats de cette étude, il paraît utile de souligner qu'une joueuse qui aspire à une carrière professionnelle doit être capable de servir au-delà de $150 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ dès l'âge de 14 ans. Par ailleurs, plusieurs travaux ont mis en évidence une relation étroite entre la vitesse du service et le niveau d'expertise (Girard et al., 2005; Martin et al., 2014; Ulbricht et al., 2016). Le classement FFT permet d'objectiver de manière assez fiable le niveau de jeu des joueurs et des joueuses. Par conséquent, nous avons aussi choisi de proposer une évaluation de la vitesse du 1^{er} service en fonction de ce paramètre (Figure 5.15 et Figure 5.16). Enfin, notre étude montre que la taille est un critère discriminant dans la production de vitesse au service. Pour aider les entraîneurs à interpréter plus efficacement la performance des joueurs et des joueuses, les Figure 5.15 et Figure 5.16 retracent également la relation entre la taille et la vitesse du 1^{er} service chez les garçons et chez les filles.

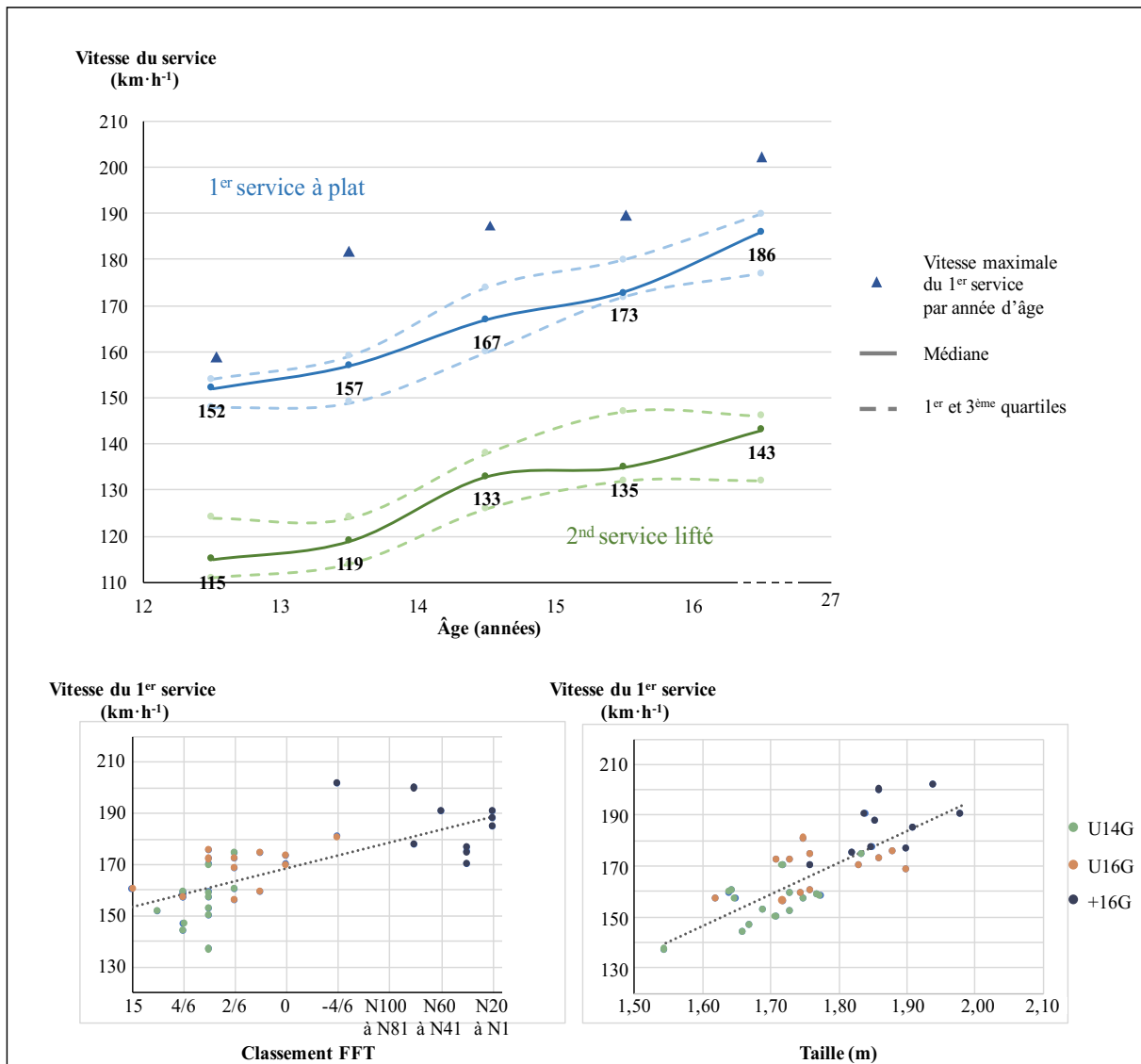


Figure 5.15 – Vitesse du service en fonction de l'âge (en haut), du classement FFT (en bas à gauche) et de la taille (en bas à droite) chez les joueurs élités.

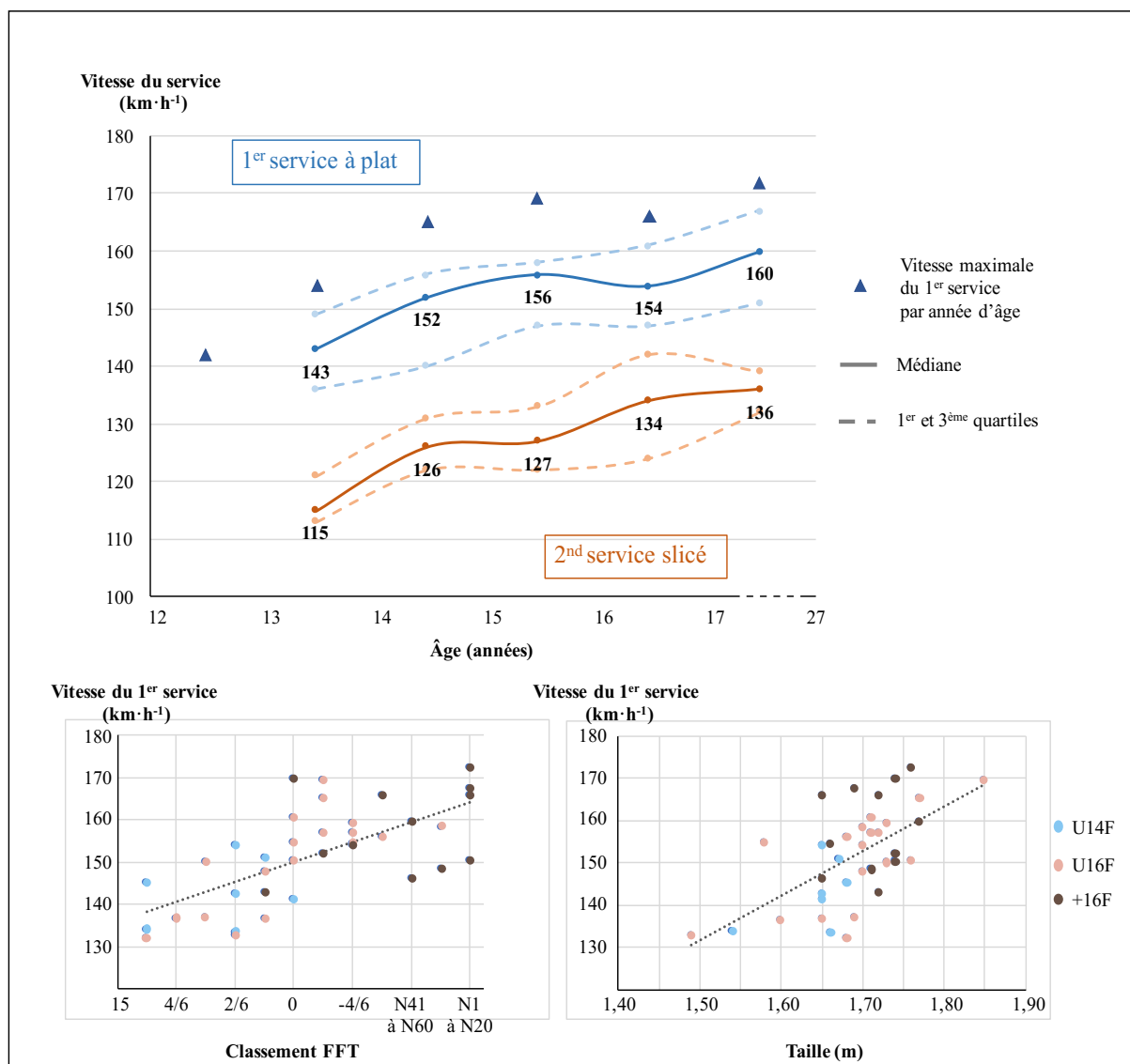


Figure 5.16 – Vitesse du service en fonction de l'âge (en haut), du classement FFT (en bas à gauche) et de la taille (en bas à droite) chez les joueuses élites.

Le projet de performance fédéral porté par la FFT (2017) soutient que les bases techniques du service doivent être installées dès l'âge de 12 ans. Nos résultats sont en accord avec ces directives fédérales et apportent surtout des données précises et objectives sur les éléments techniques qui doivent être maîtrisés par les joueurs et les joueuses de 12 – 13 ans (Figure 5.17). Par ailleurs, la FFT (2017) préconise aussi dans son rapport une maîtrise des bases tactiques du service à l'âge de 12 ans. Toutefois, même avec une technique de service efficace, le fait d'évoluer sur le même terrain que les adultes tout en étant plus petits contraint les jeunes joueurs à adopter une trajectoire de balle moins tendue au service, ce qui limite la vitesse de balle et surtout les intentions tactiques offensives (Brechbuhl et al., 2001; Hizan et al., 2015; Vaverka et Cernosek, 2013). Ces deux éléments sont pourtant à la base de la performance du service des joueurs professionnels. Afin de développer le plus tôt possible une vitesse de balle élevée et des intentions tactiques offensives, nous encourageons les entraîneurs à utiliser des situations d'entraînement moins contraignantes et qui favorisent le développement de ces qualités, par exemple en avançant la position du serveur en début de point (Figure 5.18).

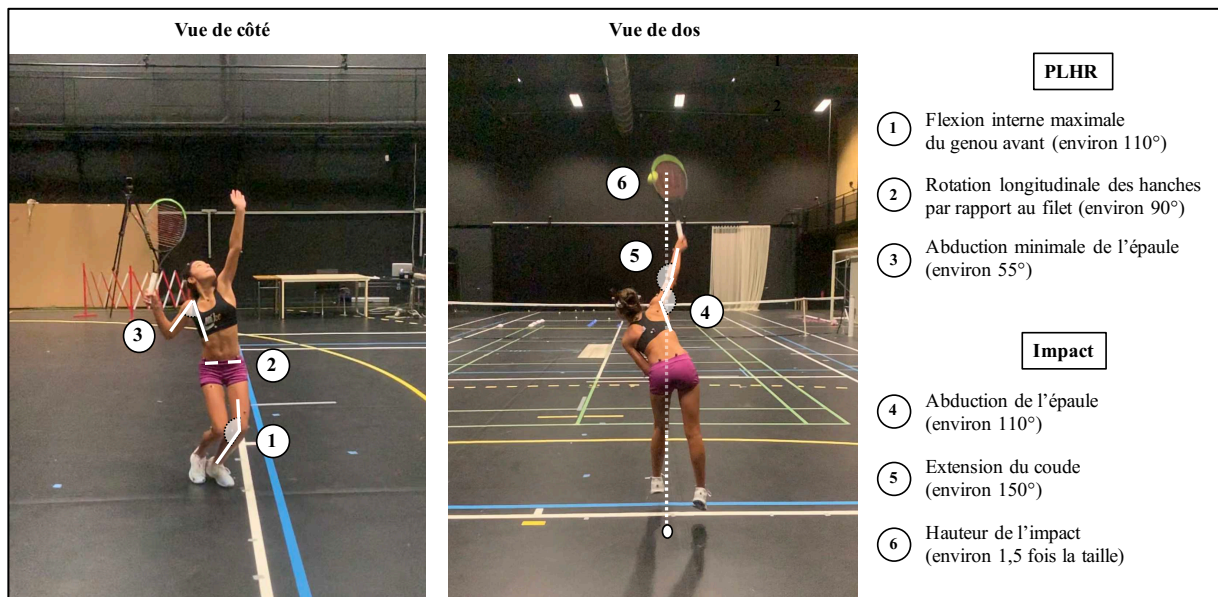


Figure 5.17 – Représentation de quelques éléments techniques du service maîtrisés chez les garçons et chez les filles dès l’âge de 12 ans. PLHR : point le plus haut de la raquette.

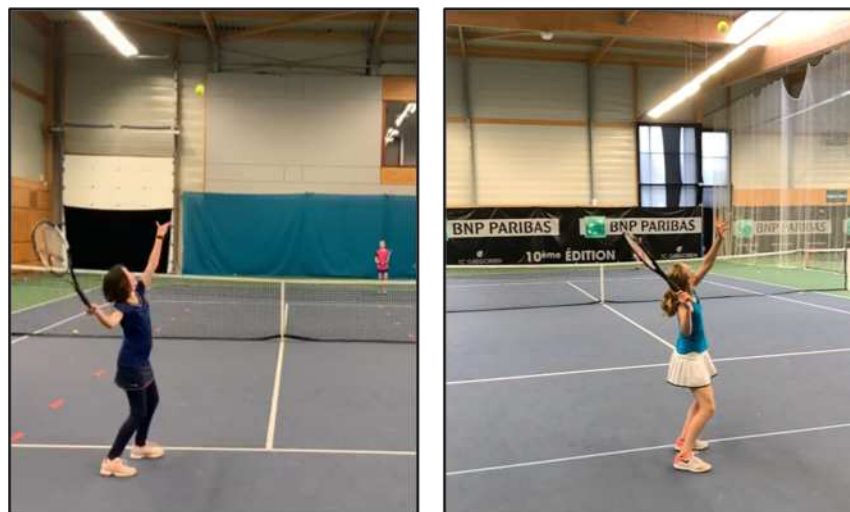


Figure 5.18 – Situation d’entraînement avec un service avancé pour favoriser la vitesse de balle et les intentions tactiques offensives chez une joueuse de 11 ans (à gauche, service sur la ligne de carré de service) et chez une joueuse de 12 ans (à droite, service de la ligne de 18 m).

À partir de 12 ans, l’optimisation de la technique du service chez les garçons passe par une amélioration de l’explosivité de la poussée des jambes, en particulier au niveau de la jambe avant (Tableau 5.3). De plus, les jeunes joueurs doivent progressivement réussir à augmenter la vitesse de rotation antéropostérieure du tronc au cours du service (Tableau 5.4). À cette fin, la Figure 5.19 présente quelques recommandations techniques liées à l’optimisation de cette vitesse segmentaire. Chez les filles, l’amplitude du vissage des épaules par rapport aux hanches (angle de séparation) est la seule différence cinématique que nous avons identifiée entre les joueuses de 12 – 13 ans et les joueuses plus âgées. Ce vissage est parfois très prononcé (Figure 5.20), notamment chez les plus jeunes (Tableau 5.7). Afin de ne pas surcharger les abdominaux et les structures lombaires, il nous semble important pour un entraîneur d’être vigilant à deux

éléments. D'une part, l'angle de séparation créé par la joueuse au cours du service doit être en adéquation avec ses qualités de souplesse, en particulier au niveau lombaire. En effet, un manque de souplesse au niveau de cette région a été identifié à la fois comme un défaut fréquent chez les jeunes et comme un facteur de risque de blessure au niveau du dos (Bylak et Hutchinson, 1998; Campbell et al., 2014; Kibler et Safran, 2005). D'autre part, l'entraîneur doit veiller à ce que la joueuse utilise la poussée des jambes, d'abord pour s'élever, et ensuite pour enclencher la rotation longitudinale des hanches. Une rotation précoce des hanches pourrait conduire à une augmentation trop importante de l'angle de séparation au moment où la raquette descend dans le dos (les épaules continuent généralement à tourner dans l'autre sens).

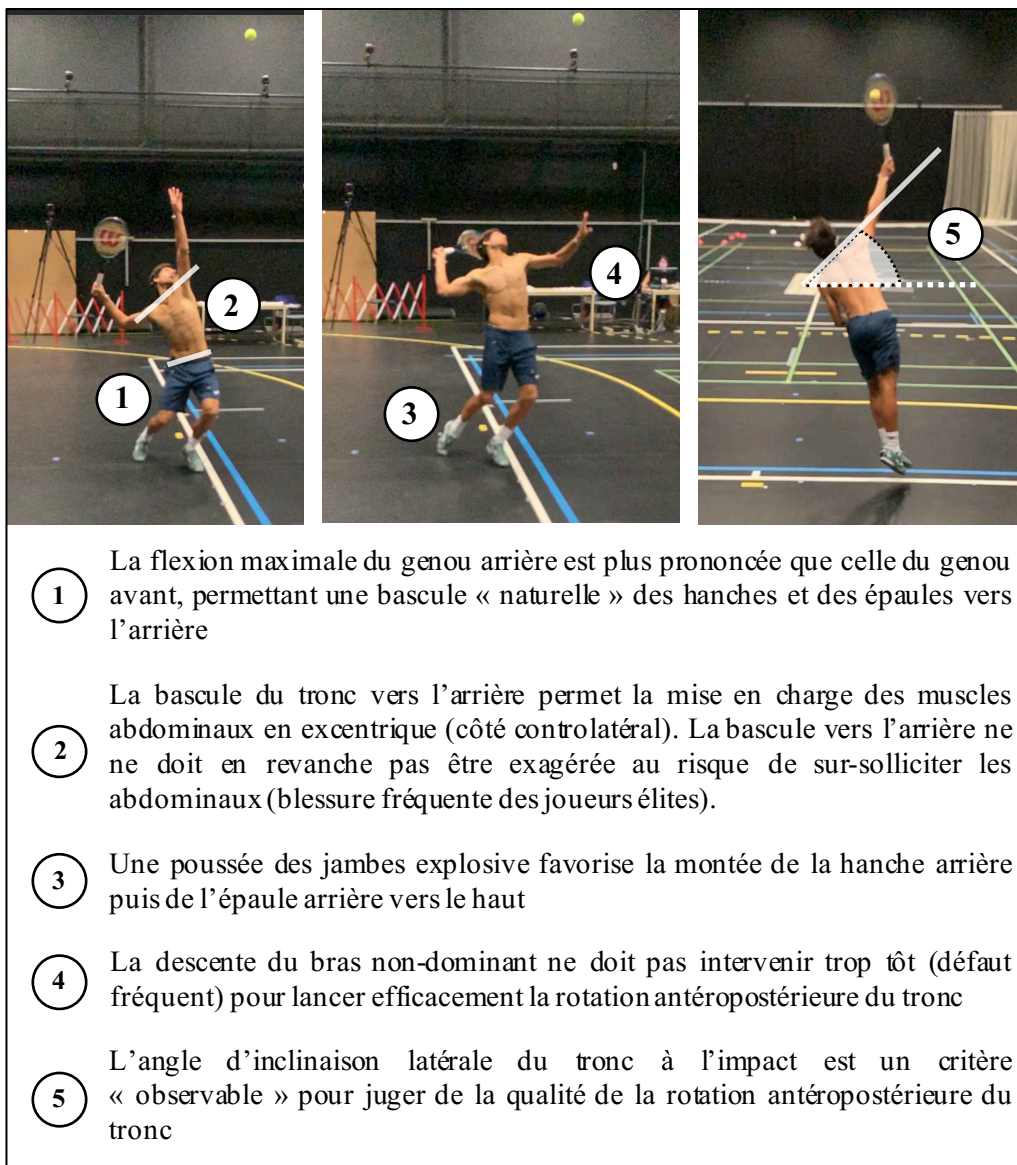


Figure 5.19 – Exemple d'un joueur professionnel au service et recommandations concernant l'optimisation de la vitesse de rotation antéropostérieure du tronc.



Figure 5.20 – Joueuse avec un angle de séparation très prononcé au début de la descente de la raquette dans le dos.

Enfin, la prévention du risque de blessures du membre supérieur doit être au centre des préoccupations d'un entraîneur dès l'âge de 12 ans chez les garçons et chez les filles. Si un renforcement musculaire général du membre supérieur est bien sûr préconisé, nos résultats suggèrent à cet âge une priorité à donner à l'épaule chez les garçons et au coude chez les filles (Figure 5.7). Des exercices à intensité sous-maximale et avec un nombre de répétitions suffisant (2 à 3 séries, 20 répétitions) doivent être privilégiés pour développer la force et surtout l'endurance musculaire (Figure 5.21) (Ellenbecker et al., 2009).



Figure 5.21 – Exemple d'exercices sous-maximaux pour améliorer la force et l'endurance musculaire du membre supérieur, d'après Ellenbecker et al. (2009). A : rotation externe de l'épaule à 90° d'abduction, B : tirage horizontal sur un ballon de fitness, C : dribbles contre le mur avec le bras en élévation, D : exercice plyométrique de dribble avec le poignet.

5.5 Conclusion

À partir de captures de mouvement de service et d'un recueil épidémiologique réalisés chez 74 joueurs et joueuses élites âgés de 12 à 27 ans, les objectifs de cette étude étaient : (a) d'analyser l'évolution de la biomécanique du service en fonction des catégories d'âge chez les garçons et chez les filles ; (b) d'objectiver les principales différences entre le service masculin et le service féminin ; (c) d'identifier les éléments techniques qui influencent la vitesse de balle ; (d) d'évaluer le risque de blessures chroniques du membre supérieur en fonction des catégories d'âge. Nos résultats montrent d'abord de grandes similitudes cinématiques entre le

service des joueurs et des joueuses de 12 – 13 ans et celui des joueurs et des joueuses de plus de 16 ans. Parmi les différences observées, l'explosivité de la poussée des jambes s'améliore chez les garçons jusqu'à 14 – 15 ans. L'étude 2 sera conduite autour de la problématique du type d'appuis au service et s'attachera à déterminer, entre autres, si celui-ci influence l'explosivité de la poussée des jambes. De plus, l'action du tronc se modifie progressivement jusqu'à 16 ans, avec une vitesse de rotation antéropostérieure du tronc qui s'accélère et une vitesse de rotation longitudinale du tronc qui apparaît plus tardivement au cours du service. Par ailleurs, la descente de la raquette dans le dos s'opère avec un tamis de raquette plus ouvert pour les garçons de 12 – 13 ans par rapport aux garçons plus âgés ou aux filles. Cette organisation, parfois décrite comme une erreur technique, fera l'objet d'une investigation approfondie dans l'étude 3 de ce travail. Chez les filles, la réduction de l'angle de séparation avec l'âge constitue l'une des seules différences cinématiques retrouvées entre les groupes. La vitesse du 1^{er} service augmente fortement chez les garçons à partir de 12 ans, et la taille joue un rôle sur cette vitesse. Cette augmentation s'observe également chez les filles mais de façon moins prononcée, les joueuses produisant vers 14 – 15 ans une vitesse de balle très comparable à celle des joueuses de plus de 16 ans. Au niveau de l'analyse dynamique, les contraintes articulaires maximales du membre supérieur augmentent progressivement chez les garçons entre 12 et 16 ans, alors que celles-ci ne sont pas dépendantes de l'âge chez les filles. Ces résultats, mis à la lumière du recueil épidémiologique de blessures, incitent à commencer un renforcement musculaire préventif du membre supérieur dès l'âge de 12 ans avec, semble-t-il, une priorité à donner à l'épaule chez les garçons et au coude chez les filles. Enfin, en comparant les services masculin et féminin au travers des différentes catégories d'âge, nos résultats montrent une vitesse de balle systématiquement supérieure chez les garçons. Les écarts de vitesse se creusent au fil des années et s'expliquent, outre la taille, par l'apparition successive de vitesses segmentaires du membre supérieur plus élevées chez les garçons : la vitesse de rotation interne de l'épaule à 12 – 13 ans, puis la vitesse de flexion du poignet à 14 – 15 ans, et enfin la vitesse d'extension du coude à partir de 16 ans. La position de l'impact de balle se différencie elle aussi progressivement avec l'âge, avec à partir de 16 ans une position d'impact plus à gauche et plus vers l'avant chez les garçons.

Cette étude apporte de nouvelles données biomécaniques sur le service des joueurs et des joueuses élites à partir de l'âge de 12 ans. Plus concrètement, ces résultats visent à fournir aux entraîneurs des informations précieuses pour individualiser efficacement, en fonction de l'âge et du sexe, les consignes liées à l'optimisation du service. Il ressort également de cette étude de très nombreux invariants techniques entre le service des joueurs et des joueuses de 12 – 13 et celui des joueurs et des joueuses plus âgés, autrement dit les critères techniques qui doivent être maîtrisés de façon précoce chez les meilleurs espoirs. Afin d'améliorer les connaissances des entraîneurs et la qualité de la formation des jeunes joueurs, de futures investigations devront explorer l'évolution biomécanique du service chez des joueurs et des joueuses entre 8 et 11 ans.

Chapitre 6

Étude 2 : Influence du type d'appuis sur la performance et les risques de blessures au service des jeunes joueurs et joueuses élites

6.1 Introduction

Le service correspond à une séquence de mouvements segmentaires qui se succèdent dans un ordre bien précis (Fleisig et al., 2003; Marshall et Elliott, 2000; Wagner et al., 2014). D'un point de vue biomécanique, cette séquence est décrite comme une chaîne cinématique. Elle fait référence à la création d'énergie mécanique au niveau des membres inférieurs, puis du transfert de cette énergie mécanique vers le tronc, le membre supérieur dominant et enfin la raquette (Bahamonde, 2000; Elliott, 2006; Elliott et Wood, 1983; Martin, 2015). Lors du service, l'action des membres inférieurs intervient pendant le lancer de balle et se caractérise par une phase de flexion puis une phase d'extension des chevilles, des genoux et des hanches. L'efficacité de cette action, qui constitue le premier maillon de la chaîne cinématique, est essentielle pour la performance et la prévention du risque de blessures. En effet, une amélioration de l'explosivité de la poussée des jambes permet d'augmenter la vitesse de balle et la hauteur de frappe et permet de diminuer les contraintes articulaires générées à l'épaule et au coude (Elliott et al., 2003; Elliott et Wood, 1983; Girard et al., 2005, 2007; Reid et al., 2008; Sweeney et al., 2012).

L'observation des joueurs et des joueuses de tennis met en avant deux organisations techniques majoritairement utilisées concernant la position des appuis et l'action des jambes au service : le service sans relais d'appuis (SRA) et le service avec relais d'appuis (RA) (Figure 6.1) (Martin, 2015; Renoult, 2007). Avec le SRA, les appuis restent fixes au sol depuis le début du mouvement jusqu'à la phase d'extension et le décollage des pieds. À l'inverse, le RA consiste, après avoir lancé la balle, à déplacer le pied arrière pour le ramener à proximité du pied avant et procéder ensuite à la flexion des membres inférieurs. Le choix pour un joueur d'adopter un type d'appuis plutôt que l'autre dépend en premier lieu des sensations personnelles (Renoult, 2007). Néanmoins, ce choix peut être modifié au cours d'une carrière quand la technique de service semble inefficace ou traumatisante (Figure 6.1). Plusieurs travaux ont été menés chez des joueurs adultes dans le but d'apporter aux entraîneurs des connaissances scientifiques concrètes sur les avantages et les inconvénients biomécaniques de ces deux types d'appuis. D'un côté, une augmentation des forces de réaction horizontales a été rapportée lors de la poussée des jambes avec un service SRA (Bahamonde et Knudson, 2001; Elliott et Wood, 1983). Ce type d'appuis favorise ainsi la propulsion en direction du filet après le service, ce qui fournit un avantage non négligeable dans le cas d'un enchaînement service – volée (Martin et al., 2012). D'un autre côté, une utilisation plus efficace de la jambe arrière a été observée lors du RA (Reid et al., 2008), permettant une augmentation des forces de réaction verticales lors de la poussée des jambes (Bahamonde et Knudson, 2001; Elliott et Wood, 1983), et par conséquent une amélioration de la hauteur de l'impact (Elliott et Wood, 1983). Par ailleurs,

l'influence du RA et du SRA sur la vitesse de balle fait l'objet de résultats contradictoires dans la littérature (Elliott et Wood, 1983; Martin et al., 2012; Reid et al., 2008; Renoult, 2007). En outre, Reid et al. (2008) ont été les seuls à s'interroger sur le risque de blessures associé à ces deux types d'appuis. Ils ont montré que les contraintes articulaires générées à l'épaule sont similaires entre RA et SRA, suggérant un risque de blessures à l'épaule identique quel que soit le type d'appuis utilisé.



Figure 6.1 – Service RA (à gauche) et service SRA (à droite) chez un joueur professionnel qui a modifié sa technique de service suite à une problématique de blessure au niveau du genou arrière.

Aucune étude biomécanique ne s'est intéressée à la problématique du RA et du SRA chez les jeunes joueurs et joueuses élites. De ce fait, les orientations techniques prises par les entraîneurs se basent actuellement sur leur expérience personnelle ou sur l'observation des joueurs et des joueuses adultes de haut niveau (Schönborn, 2002). Dans les premières années de formation, ces derniers s'accordent généralement sur deux éléments concernant les membres inférieurs : l'action des jambes est mise de côté pour faciliter l'apprentissage des fondamentaux techniques des membres supérieurs, et le SRA est privilégié pour favoriser l'équilibre et simplifier la coordination segmentaire lors du service (Genevois, 2014; Renoult, 2007). Sous l'effet de l'apprentissage et du développement physique, l'action des jambes se met ensuite progressivement en place tout au long de la formation du joueur (Whiteside et al., 2013). Les entraîneurs sont fréquemment confrontés à une faible poussée des jambes avec la technique SRA, phénomène notamment observé chez les jeunes filles (Genevois, 2014; Renoult, 2007). Par conséquent, beaucoup d'entraîneurs s'orientent vers le service RA pour améliorer la poussée des jambes des jeunes joueurs. Cette amélioration, qui n'a pas été démontrée chez les jeunes d'un point de vue scientifique, reste toutefois à l'état de supposition. Plus généralement, l'influence du type d'appuis sur la vitesse du service et sur le risque de blessures n'a pas été spécifiquement établie pour ce public. Pourtant, la vitesse du service est un élément fondamental de la performance dès l'âge de 11 ans (Ulbricht et al., 2016), et la blessure représente un frein dans l'apprentissage et la progression du jeune joueur (Kibler et Safran, 2005). Par conséquent, déterminer précisément le lien entre la technique de service (RA vs. SRA), les facteurs de performance et les risques de blessures revêt un intérêt tout particulier pour les jeunes joueurs et les jeunes joueuses impliqués dans un processus de formation vers le haut niveau.

Par ailleurs, le RA est un mouvement plus complexe que le SRA du point de vue de la coordination, et il est courant d'observer une erreur dans son exécution. Lors d'un mauvais relais d'appuis (MRA), le joueur ramène le pied arrière à côté du pied avant, et non pas derrière celui-ci (bon relais d'appuis [BRA]) (Figure 6.2) (Renoult, 2007). Les conséquences biomécaniques du MRA sont à l'état d'hypothèses dans la littérature et n'ont pas été vérifiées : dévissage précoce des hanches, poussée inefficace de la jambe arrière lors de la phase d'armé, position inadéquate du corps au moment de la frappe ou encore augmentation du risque de blessures à l'épaule et aux abdominaux (Ellenbecker, 2006; Renoult, 2007).



Figure 6.2 – Exemple d'un MRA (au premier plan) et d'un BRA (au second plan) chez deux joueuses professionnelles.

Tout d'abord, cette étude vise à comparer des variables cinématiques, des variables dynamiques et des données épidémiologiques entre le RA et le SRA, afin d'objectiver les avantages et les inconvénients biomécaniques de ces deux types d'appuis sur la performance au service et les risques de blessures des jeunes joueurs et joueuses élites. Nous formulons l'hypothèse que le RA favorise l'explosivité de la poussée des jambes lors de la phase d'armé, permettant ainsi une amélioration de la performance par rapport au SRA. Nous nous attendons aussi à retrouver une différence dans la répartition des blessures en fonction du type d'appuis utilisé par les joueurs et les joueuses.

Dans un second temps, cette étude se focalisera sur l'exécution technique du RA, afin de déterminer si le MRA est un facteur pathomécanique chez les jeunes joueuses élites. Nous supposons que le MRA implique une diminution de la poussée des jambes et de la vitesse de balle au service ainsi qu'une augmentation des contraintes articulaires maximales sur le membre supérieur. Nous pensons également observer un nombre plus important de blessures à l'épaule et au tronc chez les joueuses MRA par rapport aux joueuses BRA.

6.2 Méthodologie générale

6.2.1 Population de l'étude

Au total, 58 jeunes joueurs et joueuses élites ont été intégrés à cette étude. Le groupe des garçons était composé de 27 joueurs âgés de 12 à 16 ans (âge : $14,0 \pm 1,0$ ans, taille : $1,73 \pm 0,08$ m, masse : $59,3 \pm 8,4$ kg) et le groupe des filles de 31 joueuses âgées de 12 à 16 ans (âge : $14,9 \pm 1,2$ ans, taille : $1,68 \pm 0,07$ m, masse : $56,2 \pm 6,0$ kg).

Deux entraîneurs expérimentés ont réparti les joueurs et les joueuses en fonction du type d'appuis utilisé lors du service (groupes RA et SRA) (Figure 6.3). Après le lancer de balle, 15 joueurs et 23 joueuses déplaçaient leur pied arrière avant la flexion complète des membres inférieurs : ils ont été placés dans le groupe RA. Les 12 joueurs et les 8 joueuses pour lesquels les appuis restaient fixes depuis le début de la phase d'armé jusqu'au décollage des pieds ont formé le groupe SRA (Tableau 6.1). Dans les deux groupes RA (garçons et filles), deux nouveaux sous-groupes ont été constitués en fonction de la réalisation technique du RA (Figure 6.3). D'un côté, les joueurs et les joueuses qui ramenaient le pied arrière derrière le pied avant ont été placés dans le groupe « bon relais d'appuis » (BRA) ($n = 9$ chez les garçons, $n = 12$ chez les filles). D'un autre côté, les joueurs et les joueuses qui déplaçaient le pied arrière à côté ou devant le pied avant ont été rassemblés dans le groupe « mauvais relais d'appuis » (MRA) ($n = 6$ chez les garçons, $n = 11$ chez les filles). Les groupes BRA et MRA ont été comparés chez les filles mais pas chez les garçons, la taille du groupe MRA étant trop limitée ($n = 6$) (Figure 6.3 et Tableau 6.2). Afin de valider la composition des sous-groupes, la position du pied arrière par rapport au pied avant a été mesurée au début de la poussée des jambes. Plus précisément, la position du centre articulaire de la cheville arrière a été mesurée par rapport au centre articulaire de la cheville avant au moment de la flexion maximale du genou arrière (Tableau 6.2 et Figure 6.4). Pour chaque groupe et chaque sous-groupe, les caractéristiques de la raquette (masse, moments d'inertie et équilibre) ont été mesurées (Tableau 6.1 et Tableau 6.2).

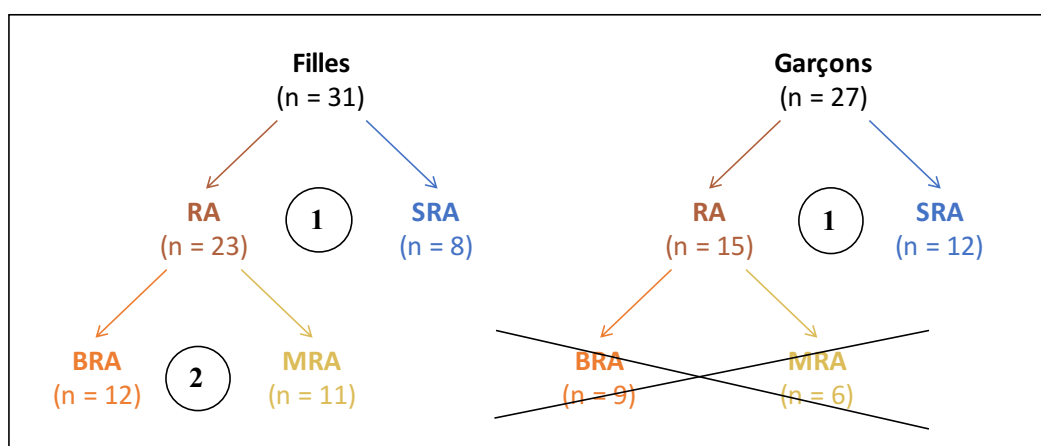


Figure 6.3 – Schéma récapitulatif du déroulé de l'étude 2. Partie 1 : comparaison du service avec relais d'appuis (RA) et sans relais d'appuis (SRA) chez les garçons et les filles. Partie 2 : comparaison du bon relais d'appuis (BRA) et du mauvais relais d'appuis (MRA) chez les filles. Le BRA et le MRA n'ont pas été comparés chez les garçons en raison de la taille du groupe MRA ($n = 6$).

	GARÇONS				FILLES			
	RA (n = 15)	SRA (n = 12)	P	Effect size	RA (n = 23)	SRA (n = 8)	P	Effect size
Caractéristiques des sujets								
Age (ans)	14,1 ± 1,1	14,0 ± 0,8	0,567	0,221	14,9 ± 1,3	14,9 ± 1,2	0,770	0,120
Taille (m)	1,75 ± 0,08	1,71 ± 0,09	0,279	0,417	1,68 ± 0,07	1,69 ± 0,07	0,766	0,123
Masse (kg)	61,0 ± 8,0	57,2 ± 8,7	0,246	0,448	56,2 ± 5,4	56,0 ± 7,8	0,924	0,036
Classement français	5/6 à -4/6	15 à 0			5/6 à N°55	5/6 à N°39		
Caractéristiques des raquettes								
Masse (kg)	0,309 ± 0,009	0,303 ± 0,009	0,127	0,710	0,303 ± 0,009**	0,317 ± 0,011	0,003	1,471
I _T (kg·m ²)	0,015 ± 0,001	0,014 ± 0,002	0,301	0,387	0,014 ± 0,001	0,014 ± 0,001	0,940	0,032
I _N (kg·m ²)	0,016 ± 0,001	0,016 ± 0,002	0,287	0,412	0,016 ± 0,001	0,016 ± 0,001	0,966	0,024
I _L (kg·m ²)	0,001 ± 0,000	0,001 ± 0,000	0,370	0,352	0,001 ± 0,000	0,001 ± 0,000	0,105	0,914
Centre de masse (m)	0,331 ± 0,005	0,331 ± 0,011	0,967	0,028	0,334 ± 0,005	0,330 ± 0,003	0,127	0,870

Tableau 6.1 – Comparaison des caractéristiques des sujets et de leur raquette en fonction du type d'appuis utilisé au service. **: P < 0,01. I_T, I_N et I_L : moments d'inertie de la raquette autour de l'axe transverse (I_T), de l'axe normal (I_N) et de l'axe longitudinal (I_L).

	FILLES			
	BRA (n = 12)	MRA (n = 11)	P	Effect size
Caractéristiques des sujets				
Age (ans)	15,0 ± 1,3	14,9 ± 1,2	0,940	0,032
Taille (m)	1,66 ± 0,09	1,70 ± 0,04	0,232	0,522
Masse (kg)	55,5 ± 5,7	57,1 ± 5,1	0,481	0,301
Classement français	4/6 à N°39	5/6 à N°54		
Écart entre les chevilles				
Latéral (m)	0,06 ± 0,02***	0,19 ± 0,08	<0,001	2,335
Antéropostérieur (m)	-0,13 ± 0,06**	-0,05 ± 0,05	0,009	1,351
Caractéristiques des raquettes				
Masse (kg)	0,306 ± 0,008	0,300 ± 0,011	0,146	0,619
I _T (kg·m ²)	0,015 ± 0,001	0,014 ± 0,001	0,101	0,854
I _N (kg·m ²)	0,016 ± 0,001	0,015 ± 0,001	0,091	0,891
I _L (kg·m ²)	0,001 ± 0,000	0,001 ± 0,000	0,208	0,537
Centre de masse (m)	0,334 ± 0,004	0,337 ± 0,006	0,181	0,583

Tableau 6.2 – Comparaison des caractéristiques des joueuses et de leur raquette en fonction de la réalisation technique du relais d'appuis. L'écart entre les chevilles représente la position latérale (X) et antéropostérieure (Y) de la cheville arrière par rapport à la cheville avant au moment de la poussée des jambes. *** : P < 0,001, ** : P < 0,01. I_T, I_N et I_L : moments d'inertie de la raquette autour de l'axe transverse (I_T), de l'axe normal (I_N) et de l'axe longitudinal (I_L).

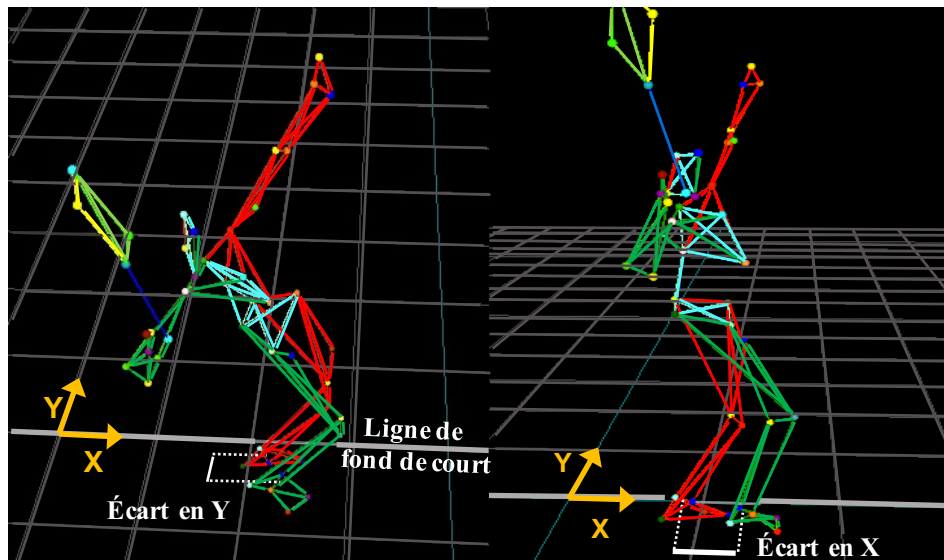


Figure 6.4 – Représentation schématique de la mesure de l'écartement des pieds au service.

6.2.2 Protocole expérimental

La méthodologie concernant la capture de mouvement, la mesure de la vitesse de balle, le calcul des données cinématiques et des contraintes articulaires ainsi que le recueil des données de blessures est identique à celle présentée dans le chapitre 4 de ce travail.

Pour les articulations du genou et de la cheville, l'amplitude d'extension (amplitude angulaire totale) représente la différence entre l'angle de flexion maximale au début de la poussée des jambes et l'angle d'extension maximale après le décollage du sol.

6.2.3 Analyses statistiques

Les valeurs moyennes et les écarts-types ont été calculés à partir des 5 essais réussis de chaque sujet pour toutes les variables. Pour préserver la cohérence des analyses statistiques, les résultats obtenus pour les sujets gauchers ont été inversés lorsque cela était nécessaire. L'analyse de l'effet de la technique d'appuis (RA vs. SRA et BRA vs. MRA) a été réalisée grâce à des tests T de Student ou des tests de Mann Whitney lorsque la distribution n'était pas considérée comme normale. Pour tous ces tests, un niveau de significativité à $P < 0,05$ a été fixé. De plus, les « effect size » (taille de l'effet) ont été calculés pour renseigner l'importance des effets statistiques observés, et ont été définis comme grands pour $d > 0,5$, moyens pour $d > 0,3$ et petits pour $d > 0,1$ (Cohen, 1988). Enfin, un test exact de Fisher a été utilisé pour déterminer l'effet de la technique d'appuis au service sur les blessures des joueurs et des joueuses. Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) (Version 20; Chicago, IL, USA).

6.3 Résultats

6.3.1 Comparaison du service avec et sans relais d'appuis

6.3.1.1 Participants

Chez les garçons comme chez les filles, il n'existe aucune différence significative entre les groupes RA et SRA en ce qui concerne l'âge, la taille et la masse (Tableau 6.1). De plus, les classements FFT des joueurs et des joueuses sont homogènes et démontrent un niveau de jeu équivalent entre les groupes. Chez les garçons, les caractéristiques des raquettes sont identiques entre les deux groupes. Chez les filles, les raquettes des joueuses SRA sont significativement plus lourdes que celles des joueuses RA (Tableau 6.1).

6.3.1.2 Variables cinématiques

6.3.1.2.1 Membres inférieurs

Les résultats obtenus concernant les variables cinématiques des membres inférieurs sont présentés dans le Tableau 6.3. Les vitesses maximales de la hanche arrière vers le haut ($P < 0,05$) et d'extension du genou arrière ($P < 0,05$ chez les garçons, $P < 0,001$ chez les filles) sont significativement supérieures avec le RA chez les garçons et chez les filles. De plus, la vitesse verticale de la hanche avant est significativement plus élevée pour les joueuses du groupe RA ($P < 0,05$), et une tendance est observée pour les joueurs avec RA ($P = 0,074$). L'amplitude d'extension du genou arrière est significativement plus grande avec le RA ($+ 7^\circ$ chez les filles et $+ 10^\circ$ chez les garçons) ($P < 0,05$) alors que l'amplitude d'extension de la cheville arrière est significativement supérieure avec le SRA ($+ 20^\circ$ chez les filles et $+ 13^\circ$ chez les garçons) ($P < 0,05$). Enfin, l'amplitude d'extension du genou avant est significativement supérieure pour le SRA, mais uniquement chez les filles (10° , $P < 0,05$).

	GARÇONS				FILLES			
	RA (n = 15)	SRA (n = 12)	P	Effect size	RA (n = 23)	SRA (n = 8)	P	Effect size
Amplitude angulaire totale								
Cheville AR (°)	55 ± 7**	68 ± 12	0,002	1,289	54 ± 7***	74 ± 7	<0,001	2,823
Cheville AV (°)	53 ± 10	47 ± 8	0,147	0,588	48 ± 12	49 ± 13	0,957	0,022
Genou AR (°)	78 ± 11*	68 ± 12	0,024	0,925	77 ± 7*	70 ± 7	0,042	0,881
Genou AV (°)	56 ± 8	58 ± 9	0,635	0,185	53 ± 10*	63 ± 13	0,025	0,905
Vitesse angulaire maximale								
Extension cheville AR (°·s ⁻¹)	636 ± 84	658 ± 106	0,558	0,226	678 ± 150	714 ± 88	0,525	0,295
Extension cheville AV (°·s ⁻¹)	424 ± 111	375 ± 40	0,163	0,582	441 ± 121	383 ± 97	0,226	0,536
Extension genou AR (°·s ⁻¹)	588 ± 96*	498 ± 129	0,048	0,792	618 ± 80***	455 ± 88	<0,001	1,935
Extension genou AV (°·s ⁻¹)	422 ± 72	415 ± 79	0,826	0,086	444 ± 56	448 ± 97	0,877	0,055
Vitesse verticale maximale								
Hanche AR (m·s ⁻¹)	2,21 ± 0,24*	1,99 ± 0,19	0,016	1,014	2,18 ± 0,27*	1,97 ± 0,16	0,045	0,964
Hanche AV (m·s ⁻¹)	1,48 ± 0,26	1,32 ± 0,20	0,074	0,732	1,46 ± 0,22*	1,28 ± 0,10	0,033	1,067

Tableau 6.3 – Comparaison par sexe des variables cinématiques des membres inférieurs en fonction du type d'appuis utilisé au service. *** : $P < 0,001$, ** : $P < 0,01$, * : $P < 0,05$. Les variables en gras tendent à être différentes ($0,05 < P < 0,1$). AR : arrière, AV : avant.

6.3.1.2.2 Tronc et membre supérieur

Les variables cinématiques mesurées chez les garçons au niveau du tronc et du membre supérieur dominant sont identiques quelle que soit la technique d'appuis utilisée (Tableau 6.4). Chez les filles, au début de la poussée des jambes, l'angle de séparation est significativement supérieur avec le RA ($P < 0,01$). L'angle de séparation maximal mesuré ensuite durant la phase d'armé n'est statistiquement plus différent entre les deux groupes. Les joueuses du groupe SRA produisent de leur côté une vitesse maximale de flexion du tronc significativement supérieure à celles du groupe RA ($+ 26^{\circ}\cdot s^{-1}$) ($P < 0,05$). Les autres variables cinématiques mesurées au niveau du tronc et du membre supérieur ne sont pas significativement différentes entre les deux groupes (Tableau 6.4). Enfin, dans les deux sexes, les variables temporelles concernant les timings d'apparition des angles maximaux et des vitesses angulaires maximales ont été calculées, et aucune différence significative n'est retrouvée entre les groupes RA et SRA.

	GARÇONS				FILLES			
	RA (n = 15)	SRA (n = 12)	P	Effect size	RA (n = 23)	SRA (n = 8)	P	Effect size
Début de la poussée								
Rotation LG des hanches (°)	94 ± 13	95 ± 17	0,906	0,046	93 ± 21	99 ± 13	0,423	0,372
Angle de séparation (°)	18 ± 11	18 ± 14	0,910	0,044	21 ± 10**	8 ± 10	0,003	1,352
Angle maximal durant l'armé								
Angle de séparation (°)	31 ± 12	30 ± 12	0,812	0,093	30 ± 10	28 ± 12	0,749	0,127
Extension du tronc (°)	13 ± 5	14 ± 6	0,640	0,186	12 ± 6	16 ± 5	0,102	0,775
Inclinaison latérale du tronc (°)	-36 ± 9	-37 ± 7	0,729	0,137	-32 ± 9	-35 ± 8	0,416	0,354
Flexion du coude (°)	55 ± 12	57 ± 10	0,755	0,124	51 ± 11	57 ± 10	0,145	0,666
ABDHOR de l'épaule (°)	10 ± 12	11 ± 12	0,748	0,125	8 ± 13	11 ± 13	0,583	0,231
ADDHOR de l'épaule (°)	22 ± 8	25 ± 8	0,274	0,441	23 ± 12	23 ± 6	0,897	0,062
RME de l'épaule (°)	176 ± 3	175 ± 3	0,834	0,081	174 ± 4	176 ± 2	0,267	0,517
Angle minimal durant l'armé								
ABD de l'épaule (°)	53 ± 11	55 ± 15	0,701	0,152	57 ± 18	57 ± 9	0,954	0,027
Vitesse angulaire maximale								
RI de l'épaule (°·s ⁻¹)	2453 ± 550	2356 ± 320	0,591	0,217	1950 ± 383	2060 ± 600	0,553	0,218
Flexion du poignet (°·s ⁻¹)	1393 ± 260	1515 ± 283	0,255	0,449	1212 ± 230	1170 ± 145	0,638	0,215
Extension du coude (°·s ⁻¹)	1709 ± 187	1634 ± 127	0,244	0,472	1606 ± 202	1613 ± 181	0,932	0,036
Rotation AP du tronc (°·s ⁻¹)	161 ± 38	161 ± 41	0,962	0,019	168 ± 53	172 ± 57	0,842	0,081
Rotation LG des épaules (°·s ⁻¹)	684 ± 72	655 ± 85	0,357	0,360	719 ± 119	681 ± 91	0,417	0,360
Rotation LG des hanches (°·s ⁻¹)	543 ± 73	538 ± 78	0,844	0,077	566 ± 110	541 ± 66	0,553	0,275
Flexion du tronc (°·s ⁻¹)	256 ± 50	274 ± 42	0,329	0,389	248 ± 32*	274 ± 20	0,047	0,943

Tableau 6.4 – Comparaison par sexe des variables cinématiques du tronc et du membre supérieur dominant en fonction du type d'appuis utilisé au service. ** : P < 0,01, * : P < 0,05. Les variables en gras tendent à être différentes (0,05 < P < 0,1). LG : longitudinale, ABDHOR : abduction horizontale, ADDHOR : adduction horizontale, RME : rotation maximale externe, ABD : abduction, RI : rotation interne, AP : antéropostérieure.

6.3.1.2.3 Impact de balle et vitesse du service

Aucune différence significative de position d'impact et de vitesse de balle n'est observée entre RA et SRA (Tableau 6.5). Toutefois, la position de l'impact de balle sur l'axe antéropostérieur tend à être différente, avec une frappe de balle plus avancée de 10 cm pour les deux groupes RA (P = 0,099 chez les garçons, P = 0,076 chez les filles).

	GARÇONS				FILLES			
	RA (n = 15)	SRA (n = 12)	P	Effect size	RA (n = 23)	SRA (n = 8)	P	Effect size
Impact de balle								
Position latérale (m)	-0,16 ± 0,15	-0,17 ± 0,19	0,799	0,098	-0,04 ± 0,10	-0,10 ± 0,16	0,289	0,394
Position antéropostérieure (m)	0,64 ± 0,14	0,54 ± 0,09	0,099	0,799	0,57 ± 0,12	0,47 ± 0,16	0,076	0,708
Position verticale (m)	2,58 ± 0,12	2,54 ± 0,12	0,540	0,264	2,47 ± 0,12	2,44 ± 0,07	0,517	0,296
Hauteur relative à la taille	1,47 ± 0,02	1,49 ± 0,02	0,106	0,665	1,47 ± 0,03	1,45 ± 0,03	0,137	0,630
Vitesse de balle (km·h ⁻¹)	163 ± 10	159 ± 12	0,431	0,307	149 ± 10	151 ± 12	0,563	0,232

Tableau 6.5 – Comparaison par sexe des caractéristiques de l'impact de balle en fonction du type d'appuis utilisé au service. Les variables en gras tendent à être différentes (0,05 < P < 0,1).

6.3.1.3 Contraintes articulaires maximales du membre supérieur

Les valeurs maximales de contraintes générées lors du service au niveau des articulations du membre supérieur sont très similaires quel que soit le type d'appuis utilisé (Figure 6.5). Chez les garçons, le pic de force antérieure au coude est la seule contrainte significativement différente entre les groupes RA ($1,7 \pm 0,2 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$) et SRA ($1,4 \pm 0,3 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$) ($P < 0,01$). Ce résultat n'est pas observé chez les filles, et aucune différence significative n'est retrouvée entre les groupes RA et SRA concernant l'ensemble des valeurs maximales de contraintes articulaires.

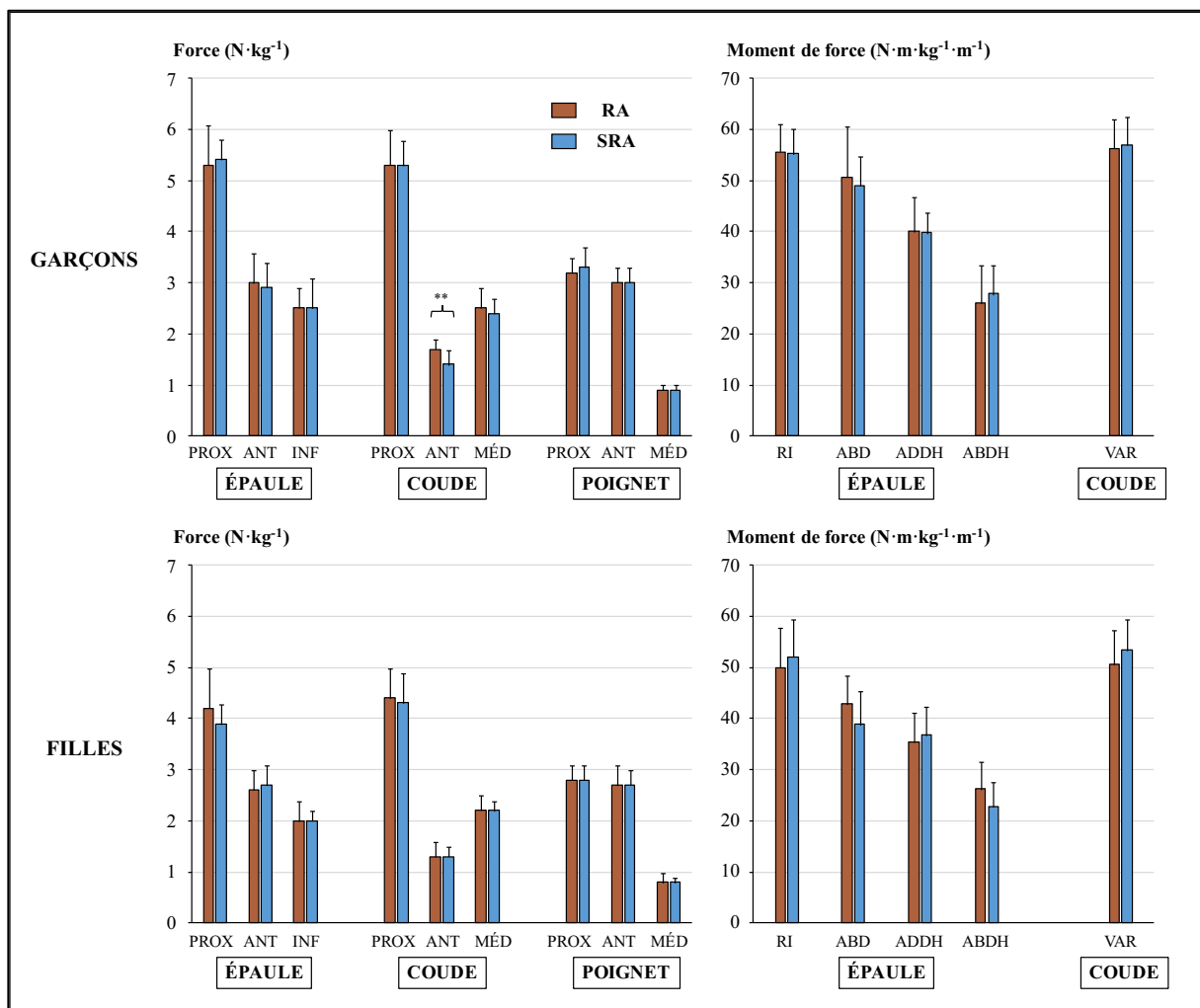


Figure 6.5 – Comparaison par sexe des contraintes articulaires maximales du membre supérieur dominant en fonction du type d'appuis utilisé au service. ** : $P < 0,01$. PROX : proximale, ANT : antérieure, INF : inférieure, MÉD : médiale, RI : rotation interne, ABD : abduction, ADDH : adduction horizontale, ABDH : abduction horizontale, VAR : varus.

6.3.1.4 Blessures

Chez les garçons, le recueil épidémiologique montre que 20 joueurs se sont blessés durant l'année précédant l'expérimentation. Ils ont déclaré un nombre total de 42 blessures.

Plus précisément, 13 joueurs du groupe RA (87 %) ont rapporté 28 blessures (soit 2,2 blessures / joueur blessé) et 7 joueurs du groupe SRA (58 %) ont rapporté 14 blessures (soit 2 blessures / joueur blessé). Un test exact de Fisher ne révèle aucune différence significative dans l'incidence totale des blessures entre les deux groupes ($P = 0,185$). Concernant la répartition anatomique des blessures (Figure 6.6), 8 joueurs du groupe RA (53 %) et 2 joueurs du groupe SRA (17 %) ont été affectés par une blessure à l'épaule ($P = 0,107$). Les blessures au coude ont concerné 4 joueurs du groupe RA (27 %) et un joueur du groupe SRA (8 %) ($P = 0,342$).

Chez les filles, 23 joueuses ont subi un total de 41 blessures avec la répartition suivante : 16 joueuses du groupes RA (70 %) ont rapporté 27 blessures (soit 1,7 blessures / joueuse blessée) et 7 joueuses du groupe SRA (87 %) ont rapporté 14 blessures (soit 2 blessures / joueuse blessée). Il n'existe pas de différence significative concernant l'incidence totale des blessures entre les deux groupes ($P = 0,642$). Aucune joueuse du groupe SRA n'a mentionné de blessure au niveau de la paroi abdominale, alors que cette blessure est la plus fréquente pour les joueuses du groupe RA (6 joueuses blessées sur 23 dont 3 joueuses ayant fait une récurrence). La quasi-totalité de ces blessures se situe sur le muscle grand droit côté non-dominant (8 blessures sur 9). Les blessures au dos ont concerné 3 joueuses du groupe SRA (37 %) et 5 joueuses du groupe RA (22 %) (Figure 6.6). Un test exact de Fisher ne montre aucune différence significative dans la répartition anatomique des blessures entre les deux groupes ($P = 0,298$ pour les abdominaux, $P = 0,393$ pour le dos).

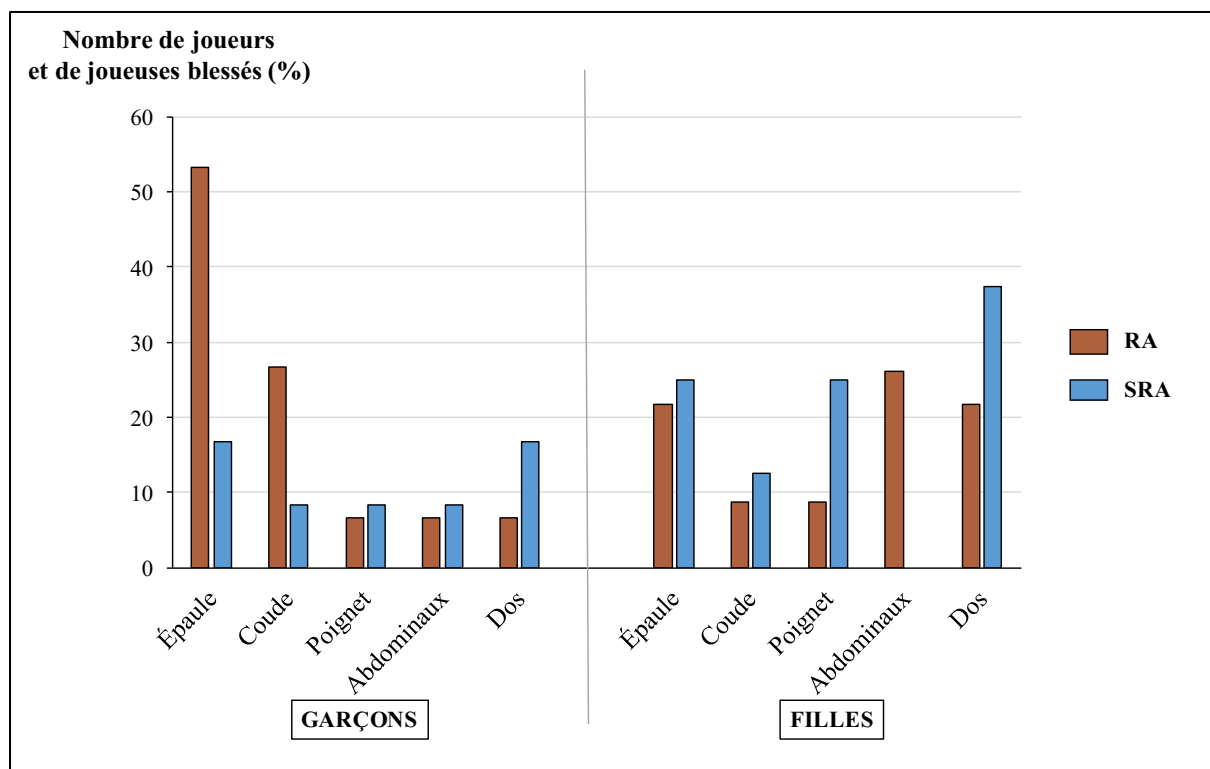


Figure 6.6 – Répartition du nombre de joueurs et de joueuses blessés par région anatomique en fonction du type d'appuis utilisé au service.

6.3.2 Comparaison entre bon et mauvais relais d'appuis

6.3.2.1 Participantes

Les résultats montrent que les joueuses du groupe MRA ramènent le pied arrière significativement plus « sur le côté » ($P < 0,001$) et plus « en avant » ($P < 0,01$) que les joueuses du groupe BRA (Tableau 6.2 et Figure 6.7). Il n'existe aucune différence significative entre les deux groupes concernant l'âge, la taille, la masse des joueuses et les caractéristiques des raquettes (Tableau 6.2). Le niveau de jeu, représenté par le classement français de chaque joueuse, est homogène entre les deux groupes (BRA et MRA) (Tableau 6.2).

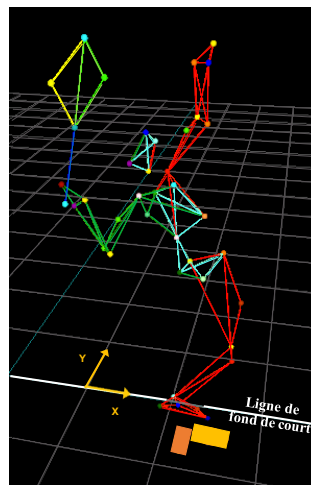


Figure 6.7 – Représentation de la position moyenne du pied arrière au moment de la flexion maximale du genou arrière pour le groupe BRA (en orange) et le groupe MRA (en jaune). La jambe avant est représentée en rouge sur la figure.

6.3.2.2 Variables cinématiques

6.3.2.2.1 Membres inférieurs

Les variables cinématiques mesurées au niveau des membres inférieurs sont très comparables entre les groupes BRA et MRA (Tableau 6.6).

	BRA (n = 12)	MRA (n = 11)	P	Effect size
Amplitude angulaire totale				
Cheville AR (°)	53 ± 9	54 ± 5	0,626	0,209
Cheville AV (°)	50 ± 13	46 ± 11	0,482	0,299
Genou AR (°)	77 ± 8	76 ± 7	0,841	0,053
Genou AV (°)	53 ± 12	53 ± 7	0,635	0,085
Vitesse angulaire maximale				
Extension cheville AR (°·s ⁻¹)	685 ± 175	671 ± 124	0,825	0,094
Extension cheville AV (°·s ⁻¹)	456 ± 114	425 ± 133	0,555	0,239
Extension genou AR (°·s ⁻¹)	633 ± 78	601 ± 83	0,350	0,399
Extension genou AV (°·s ⁻¹)	457 ± 64	430 ± 45	0,260	0,487
Vitesse verticale maximale				
Hanche AR (m·s ⁻¹)	2,23 ± 0,27	2,12 ± 0,26	0,341	0,407
Hanche AV (m·s ⁻¹)	1,45 ± 0,24	1,48 ± 0,21	0,806	0,104

Tableau 6.6 – Comparaison des variables cinématiques des membres inférieurs en fonction de la réalisation technique du relais d'appuis. AR : arrière, AV : avant.

6.3.2.2.2 Tronc et membre supérieur

Nos résultats ne montrent aucune différence significative entre les deux groupes concernant les angles maximaux et les vitesses angulaires maximales mesurés au niveau du tronc et du membre supérieur au cours du service (Tableau 6.7). Toutefois, au début de la poussée des jambes, les joueuses MRA démontrent un angle de rotation longitudinale des hanches par rapport au filet qui tend à être inférieur (- 18°) et un angle de séparation qui tend à être supérieur (+ 8°) par rapport aux joueuses BRA. L'angle de séparation maximal mesuré au cours de la phase d'armé tend également à être plus prononcé chez ces joueuses (+ 8°). Par ailleurs, les vitesses maximales de rotation longitudinale des hanches et des épaules ont tendance à diminuer avec le MRA (respectivement - 84°·s⁻¹ et - 94°·s⁻¹) tandis que la vitesse maximale de flexion du poignet a tendance à augmenter (+ 175°·s⁻¹) (Tableau 6.7).

	BRA (n = 12)	MRA (n = 11)	P	Effect size
Début de la poussée				
Rotation LG des hanches (°)	102 ± 22	84 ± 18	0,052	0,822
Angle de séparation (°)	17 ± 10	25 ± 9	0,053	0,762
Angle maximal durant l'armé				
Angle de séparation (°)	26 ± 10	34 ± 9	0,063	0,516
Extension du tronc (°)	12 ± 7	11 ± 6	0,778	0,126
Inclinaison latérale du tronc (°)	-34 ± 11	-31 ± 7	0,576	0,242
Flexion du coude (°)	48 ± 10	53 ± 11	0,286	0,457
ABDHOR de l'épaule (°)	11 ± 16	5 ± 10	0,338	0,412
ADDHOR de l'épaule (°)	23 ± 12	22 ± 14	0,938	0,032
RME de l'épaule (°)	173 ± 3	176 ± 3	0,143	0,636
Angle minimal durant l'armé				
ABD de l'épaule (°)	51 ± 18	63 ± 15	0,124	0,687
Vitesse angulaire maximale				
RI de l'épaule (°·s ⁻¹)	1974 ± 419	1925 ± 360	0,766	0,126
Flexion du poignet (°·s ⁻¹)	1128 ± 204	1303 ± 231	0,067	0,801
Extension du coude (°·s ⁻¹)	1656 ± 152	1552 ± 241	0,226	0,514
Rotation AP du tronc (°·s ⁻¹)	172 ± 40	163 ± 67	0,690	0,167
Rotation LG des épaules (°·s ⁻¹)	762 ± 79	672 ± 140	0,069	0,790
Rotation LG des hanches (°·s ⁻¹)	606 ± 57	522 ± 139	0,066	0,796
Flexion du tronc (°·s ⁻¹)	251 ± 25	246 ± 40	0,679	0,173

Tableau 6.7 – Comparaison des variables cinématiques du tronc et du membre supérieur dominant en fonction de la réalisation technique du relais d'appuis. Les variables en gras tendent à être différentes ($0,05 < P < 0,1$). LG : longitudinale, ABDHOR : abduction horizontale, ADDHOR : adduction horizontale, RME : rotation maximale externe, ABD : abduction, RI : rotation interne, AP : antéropostérieure.

Les timings d'apparition des vitesses angulaires maximales au cours du service ont été comparés entre les joueuses MRA et BRA (Figure 6.8). La vitesse maximale de rotation antéropostérieure du tronc a lieu significativement plus tôt pour les joueuses du groupe MRA (respectivement $94,1 \pm 1,8$ % contre $95,7 \pm 1,5$ %, $P < 0,05$, $d = 0,221$). À l'inverse, la vitesse maximale de rotation longitudinale des hanches tend à apparaître plus tardivement chez ces mêmes joueuses ($92,1 \pm 2,8$ % contre $89,5 \pm 2,9$ % pour les joueuses BRA, $P = 0,103$, $d = 0,124$). Lors du service MRA, la vitesse maximale de rotation longitudinale des épaules précède celle des hanches, alors que l'inverse est observé pour le service BRA. Les timings d'apparition de la vitesse maximale d'extension du coude, de flexion du poignet et de rotation interne de l'épaule ne sont pas significativement différents entre les deux groupes.

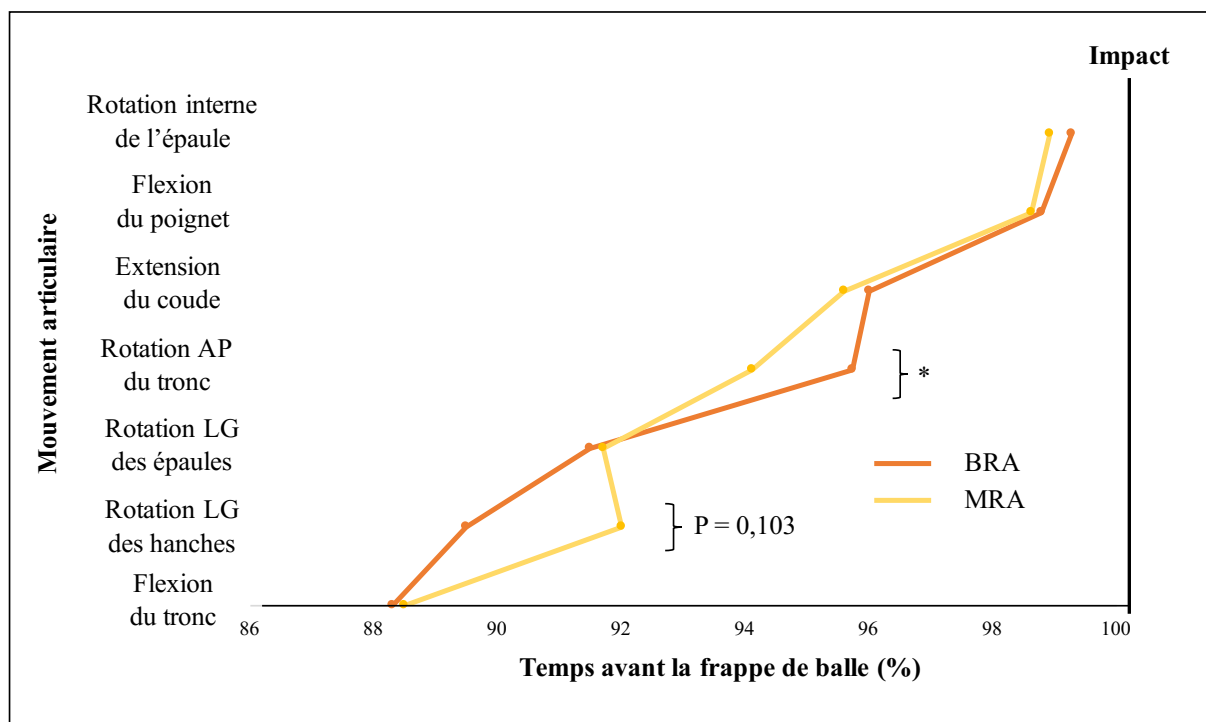


Figure 6.8 – Comparaison des timings d'apparition des vitesses angulaires maximales au service en fonction de la réalisation technique du relais d'appuis. * : $P < 0,05$. AP : antéropostérieure, LG : longitudinale.

6.3.2.2.3 Impact de balle

Aucune différence significative n'est retrouvée concernant la vitesse du service des groupes BRA ($147 \pm 10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) et MRA ($150 \pm 10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$). De plus, les composantes latérale (en X), antéropostérieure (en Y) et verticale (en Z) de l'impact de balle sont identiques entre les deux groupes (Tableau 6.8).

	FILLES			Effect size
	BRA (n = 12)	MRA (n = 11)	P	
Impact de balle				
Position latérale (m)	$-0,06 \pm 0,13$	$-0,03 \pm 0,06$	0,575	0,241
Position antéropostérieure (m)	$0,57 \pm 0,14$	$0,56 \pm 0,11$	0,743	0,139
Position verticale (m)	$2,44 \pm 0,13$	$2,50 \pm 0,10$	0,199	0,556
Hauteur relative à la taille	$1,47 \pm 0,04$	$1,47 \pm 0,03$	0,906	0,019
Vitesse de balle ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	147 ± 10	150 ± 10	0,532	0,265

Tableau 6.8 – Comparaison des caractéristiques de l'impact de balle en fonction de la réalisation technique du relais d'appuis.

6.3.2.3 Contraintes articulaires maximales du membre supérieur

Les pics des forces et des moments de forces mesurés sur le membre supérieur au cours du service ne sont pas significativement différents entre les joueuses des groupes BRA et MRA (Figure 6.9).

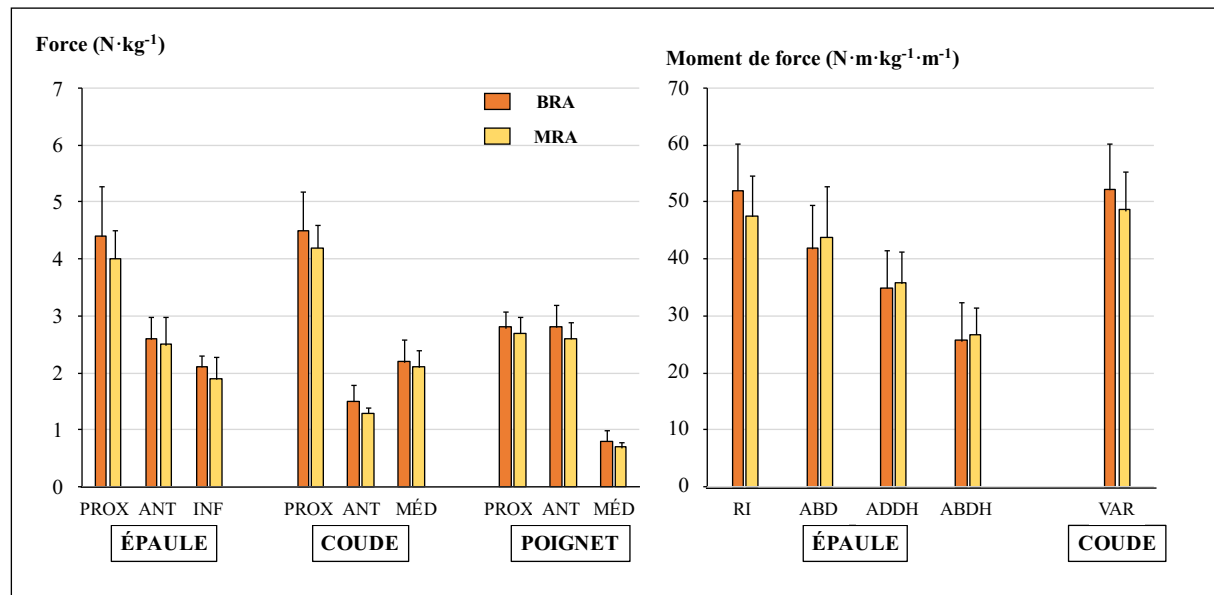


Figure 6.9 – Comparaison des contraintes articulaires maximales du membre supérieur dominant en fonction de la réalisation technique du relais d'appuis chez les joueuses. PROX : force proximale, ANT : force antérieure, INF : force inférieure, MÉD : force médiale, RI : moment de rotation interne, ABD : moment d'abduction, ADDH : moment d'adduction horizontale, ABDH : moment d'abduction horizontale, VAR : moment de varus.

6.3.2.4 Blessures

Le recueil épidémiologique révèle que 9 joueuses avec un BRA (75 %) se sont blessées durant l'année précédant l'expérimentation (11 blessures au total, soit 1,2 blessures / joueuse blessée). Dans le groupe MRA, 8 joueuses (82 %) ont rapporté un total de 16 blessures (2 blessures / joueuse blessée). Un test exact de Fisher ne montre aucune différence significative entre les deux groupes concernant l'incidence générale des blessures et l'incidence des blessures par région anatomique. Aucune joueuse du groupe MRA n'a rapporté de blessure au coude, alors que c'est le cas pour deux joueuses du groupe BRA ($P = 0,478$) (Figure 6.10). À l'inverse, les joueuses MRA ont été plus nombreuses à se blesser à l'épaule (4 joueuses contre 1 joueuse BRA, $P = 0,155$), aux abdominaux (4 joueuses contre 2 joueuses BRA, $P = 0,371$) et au dos (3 joueuses contre 2 joueuses BRA, $P = 0,640$) (Figure 6.10). Un paramètre cinématique du service distingue les joueuses MRA qui n'ont pas été blessées au dos ($n = 8$) de celles qui ont déclaré avoir subi ce type de blessure ($n = 3$). Pour ces dernières, l'angle des hanches est significativement supérieur au début de la poussée des jambes par rapport aux joueuses non blessées, et ce, sans différence au niveau du positionnement du pied arrière (Tableau 6.9). Aucune autre association n'a pu être mise en évidence entre les paramètres cinématiques du service et la localisation des blessures au sein des groupes BRA et MRA.

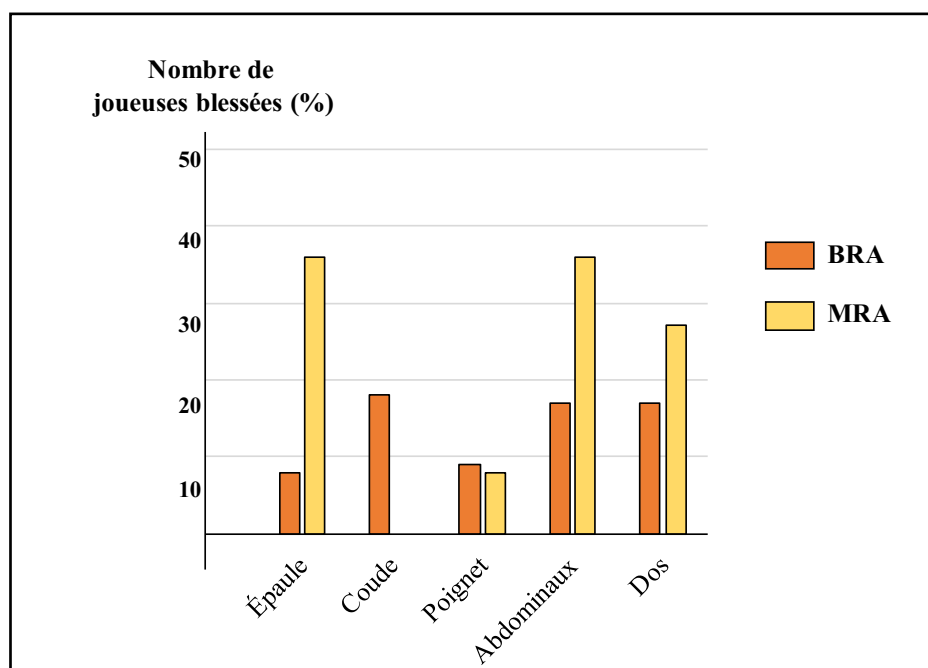


Figure 6.10 – Répartition du nombre de joueuses blessées au niveau du membre supérieur et du tronc en fonction de la réalisation technique du relais d’appuis.

	JOUEUSES MRA			
	Blessées (n = 3)	Non blessées (n = 8)	P	Effect size
Début de la poussée				
Écart latéral des chevilles (m)	0,18 ± 0,03	0,20 ± 0,09	0,881	0,248
Écart AP des chevilles (m)	0,06 ± 0,07	0,06 ± 0,04	0,909	0,058
Rotation LG des hanches (°)	106 ± 11**	76 ± 12	0,003	2,546

Tableau 6.9 – Comparaison du positionnement des pieds et de la rotation longitudinale des hanches au début de la poussée des jambes entre des joueuses MRA blessées au dos et des joueuses MRA non blessées à cet endroit. ** : P < 0,01.

6.4 Discussion

Les buts de cette étude étaient :

- (a) de comparer les techniques de RA et SRA afin d’identifier leurs conséquences biomécaniques sur la performance et les risques de blessures des jeunes joueurs et joueuses élites

- (b) de s’intéresser à la réalisation technique du RA, afin de déterminer si une mauvaise exécution du RA marquée par une avancée du pied arrière à hauteur du pied avant (MRA) constitue un facteur pathomécanique pour les jeunes joueuses élites.

Nos résultats montrent tout d’abord que, si l’explosivité de la poussée des jambes est bien supérieure avec le RA par rapport au SRA (Tableau 6.3), cette augmentation n’a aucune

incidence sur deux éléments essentiels de la performance au service, à savoir la vitesse de balle et la hauteur de l'impact (Tableau 6.5) (Brechbuhl et al., 2001; Fleisig et al., 2003; Whiteside et Reid, 2017). De plus, les contraintes articulaires maximales du membre supérieur sont comparables entre le RA et le SRA. Ce résultat suggère un risque de blessures identique à l'épaule, au coude et au poignet entre ces deux techniques d'appuis, ce qui est confirmé par notre recueil épidémiologique.

Par ailleurs, la réalisation technique du RA s'est avérée incorrecte chez de nombreuses joueuses de notre population d'étude (MRA). Cette organisation technique n'affecte pas la performance au service par rapport à une bonne réalisation du relais d'appuis (BRA) (Tableau 6.8). Toutefois, le MRA semble modifier certains paramètres cinématiques du tronc (Tableau 6.7 et Figure 6.8), ce qui nous laisse supposer que cette technique de service est moins juste et donc plus traumatisante pour les joueuses.

6.4.1 Comparaison du service avec et sans relais d'appuis

6.4.1.1 Influence du type d'appuis sur l'action des jambes

Nos résultats montrent une amélioration du dynamisme de la poussée des jambes avec le RA par rapport au SRA. En effet, les vitesses verticales maximales de la hanche arrière et de la hanche avant sont supérieures avec ce type d'appuis, quel que soit le sexe des joueurs (Tableau 6.3). Dans la littérature scientifique, ces vitesses sont considérées comme de très bons indicateurs de l'explosivité de la poussée des membres inférieurs au service (Sweeney et al., 2012; Whiteside et al., 2013). L'augmentation significative de la vitesse verticale maximale de la hanche arrière avec le RA est vraisemblablement en lien avec l'augmentation significative de l'amplitude et de la vitesse maximale d'extension du genou arrière que nous avons mesurée avec cette technique de service (Tableau 6.3). Chez des joueurs adultes de haut niveau, Reid et al. (2008) ont également rapporté une augmentation de la vitesse maximale d'extension du genou arrière pour le RA par rapport au SRA. Par ailleurs, la vitesse maximale d'extension des chevilles a été identifiée dans la littérature comme un critère essentiel dans l'efficacité de la poussée des jambes au service (Whiteside et al., 2013). Notre analyse montre que la vitesse maximale d'extension de la cheville arrière est identique avec les deux types d'appuis, et ce, malgré une augmentation significative de l'amplitude totale d'extension de la cheville avec le SRA (Tableau 6.3). Par conséquent, nos résultats mettent plutôt en exergue la vitesse maximale d'extension du genou arrière comme étant le critère qui permet aux joueurs RA de produire une action plus explosive lors de la poussée des jambes. Concernant les paramètres cinématiques de la jambe avant, Reid et al. (2008) ont démontré que l'écartement des appuis avec le SRA favorise la flexion du genou avant, ce qui aboutit à une augmentation de l'amplitude totale d'extension du genou lors de la poussée des jambes ($65 \pm 12^\circ$ contre $54 \pm 12^\circ$ pour le RA). De notre côté, nous retrouvons ce résultat uniquement chez les filles (amplitude d'extension du genou avant de $63 \pm 13^\circ$ pour le SRA contre $53 \pm 10^\circ$ pour le RA, $P < 0,05$) (Tableau 6.6). L'augmentation de ce paramètre n'a toutefois aucune incidence sur la vitesse maximale du genou avant. Plus généralement, les vitesses maximales d'extension de la cheville et du genou avant ne sont pas influencées par la technique d'appuis des joueurs et des joueuses (Tableau 6.3). L'ensemble de ces résultats suggère que le RA, en favorisant l'amplitude et la vitesse d'extension du genou arrière, permet d'augmenter la vitesse verticale maximale des hanches et donc la qualité de la poussée des membres inférieurs. Dans l'étude 1 de ce travail, nous avons observé que l'explosivité de la poussée des jambes s'améliore chez les garçons entre 12 et

15 ans. Nous avons aussi remarqué un nombre plus important de joueurs à utiliser le relais d'appuis dans la catégorie 14 – 15 ans par rapport à la catégorie 12 – 13 ans. Par conséquent, les résultats de cette étude suggèrent que l'amélioration de l'explosivité de la poussée des jambes que nous avons observée chez les garçons est aussi le reflet d'une utilisation plus fréquente du RA avec l'âge. Toutefois, les joueuses plus âgées sont aussi plus nombreuses à utiliser le RA par rapport aux joueuses de 12 – 13 ans, mais nous n'observons pas d'amélioration de la poussée des jambes au travers des catégories d'âge (étude 1). Le niveau de force des membres inférieurs, qui augmente chez les garçons entre 12 et 15 ans (Barber-Westin et al., 2006), est très certainement le principal critère à prendre en compte pour analyser l'évolution de l'explosivité de la poussée des jambes chez les garçons.

6.4.1.2 Influence du type d'appuis sur l'action du tronc et du membre supérieur

Au regard de nos résultats concernant les membres inférieurs, il aurait été logique d'observer entre les deux types d'appuis une organisation biomécanique différente au niveau du tronc et du membre supérieur. Par exemple, plusieurs auteurs ont estimé que l'amélioration de l'efficacité de la poussée des jambes permet de faciliter la descente de la raquette dans le dos, ce qui pourrait conduire à une augmentation de l'amplitude de la RME de l'épaule lors du service (Kovacs et Ellenbecker, 2011; Reid et al., 2008). Nos résultats ne supportent pas cette hypothèse puisque que cette variable est identique entre les groupes RA et SRA quel que soit le sexe (Tableau 6.4). Par ailleurs, nous avons suggéré dans l'étude 1 de ce travail que, si le RA permettait d'améliorer l'explosivité de la poussée des jambes, il pourrait également contribuer à améliorer la vitesse de rotation antéropostérieure du tronc. Nos résultats ne soutiennent pas cette hypothèse et montrent que cette vitesse est identique quel que soit le type d'appuis utilisé.

Plus généralement, il n'existe aucune différence entre les deux groupes masculins concernant les angles maximaux et les vitesses angulaires maximales mesurés au niveau du tronc et du membre supérieur (Tableau 6.4). De plus, les timings d'apparition de l'ensemble de ces paramètres cinématiques sont identiques entre les deux groupes.

Comme pour les garçons, nous remarquons chez les filles que ces paramètres cinématiques et leur timing d'apparition au cours du service sont très comparables quel que soit le type d'appuis utilisé (Tableau 6.4). Toutefois, deux différences concernant les paramètres cinématiques du tronc sont à souligner entre les joueuses RA et SRA.

L'angle de séparation correspond à la différence angulaire mesurée entre la rotation longitudinale des hanches et celle des épaules. Dans la littérature, cet angle est envisagé comme un indicateur de l'étirement et de la mise en tension excentrique des muscles abdominaux (Dowling et al., 2016; Fleisig et al., 1996; Maquirriain et al., 2007). Au début de la poussée des jambes, nos résultats montrent que l'angle de séparation est supérieur pour les joueuses RA par rapport aux joueuses SRA (Tableau 6.4). Ensuite, lorsque la raquette commence à descendre dans le dos, l'angle de séparation augmente pour atteindre une valeur maximale d'environ 30° pour les deux groupes (Tableau 6.4). Ce dernier résultat suggère une mise en tension excentrique maximale des muscles abdominaux identique au cours du service entre les joueuses RA et les joueuses SRA. En revanche, les joueuses RA procèdent théoriquement à une mise en tension excentrique plus précoce par rapport aux joueuses SRA. Lors du service et des mouvements de lancer, cette mise en tension peut être le reflet du « vissage » des épaules par rapport aux hanches mais aussi du « dévissage » des hanches par rapport aux épaules (Chu et al., 2009; Fleisig et al., 1996). Afin de mieux comprendre la différence observée entre les joueuses RA et SRA, nous avons mesuré la rotation longitudinale des hanches par rapport au

filet et l'angle de séparation sur toute la durée du service (Figure 6.11). Pour les deux groupes, la rotation longitudinale des hanches reste relativement constante entre le lancer de balle et le début de la poussée des jambes. Par conséquent, l'augmentation de l'angle de séparation sur cet intervalle de temps provient du « vissage » des épaules par rapport aux hanches. Pour les joueuses RA, le début de ce vissage intervient assez vite après le lancer de balle (environ 30 % de la durée du service) alors qu'il commence plus tardivement pour les joueuses SRA (environ 50 % de la durée du service) (Figure 6.11). Ensuite, l'enchaînement des rotations longitudinales des hanches et des épaules se déroule de la même façon dans les deux groupes : (a) entre la poussée des jambes et la RME de l'épaule, le « dévissage » des hanches commence (rotation vers la gauche pour une joueuse droitère) mais l'angle de séparation continue d'augmenter, ce qui caractérise le « retard » de la rotation longitudinale des épaules par rapport à celle des hanches (Chu et al., 2009) ; (b) entre la RME de l'épaule et l'impact de balle, la contraction concentrique des muscles abdominaux permet de réduire l'angle de séparation (Chu et al., 2009), ce qui témoigne à cet instant d'une vitesse de rotation longitudinale des épaules supérieure à celle des hanches. Pour résumer l'ensemble de ces observations, la seule différence retrouvée entre le RA et le SRA concerne la durée de mise en tension excentrique des muscles abdominaux, qui est plus longue lors du service RA. D'après Maquirriain (2007), plus la mise en tension excentrique d'un muscle est brève, plus l'utilisation de l'énergie élastique est efficace, ce qui permet ensuite d'optimiser la contraction concentrique du muscle. Ainsi, l'hypothèse d'une moins bonne utilisation de la contraction excentrique des muscles abdominaux peut être avancée pour les joueuses RA. Cette hypothèse en amène une deuxième concernant une contraction concentrique éventuellement plus forte pour ces joueuses puisqu'elles produisent une vitesse de rotation longitudinale du tronc identique à celle des joueuses SRA (Tableau 6.4). Dans la littérature, l'enchaînement de ces deux modes de contraction est souvent mis en cause pour expliquer les mécanismes de blessures aux abdominaux (Chow et al., 2009; Maquirriain et al., 2007). Notre recueil épidémiologique ne nous permet pas de conclure à une augmentation significative du risque de développer ce type de blessure avec le RA par rapport au SRA ($P = 0,298$). Il semble néanmoins important de souligner que 6 joueuses du groupe RA ont déclaré une blessure aux muscles abdominaux durant l'année précédant l'analyse biomécanique du service (3 récurrences), alors qu'aucune joueuse du groupe SRA n'a subi ce type de blessure (Figure 6.6). Une investigation supplémentaire comprenant une évaluation EMG des muscles abdominaux au cours du service devra être menée afin de déterminer si le RA représente une technique de service plus traumatisante pour les abdominaux que le SRA.

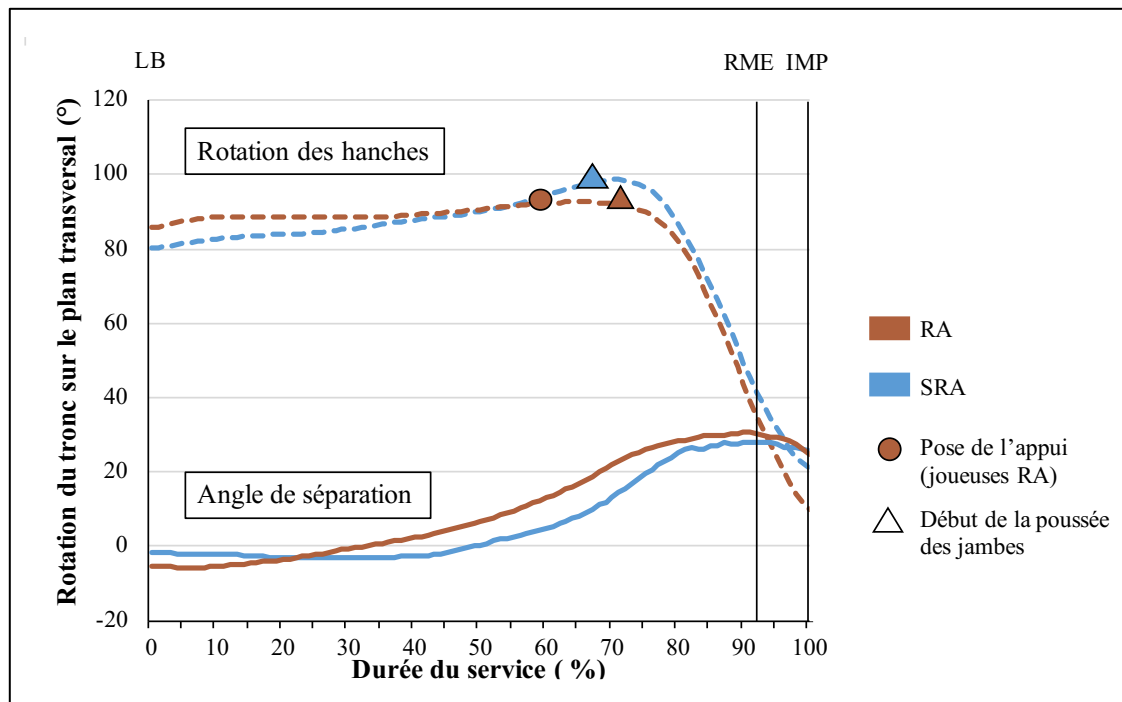


Figure 6.11 – Évolution de la rotation longitudinale des hanches et de l'angle de séparation au cours du service en fonction du type d'appuis chez les filles. LB : lancer de balle, RME : rotation maximale externe de l'épaule, IMP : impact de balle.

La seconde différence entre les deux groupes féminins concerne la vitesse maximale de flexion du tronc qui est significativement supérieure pour le groupe SRA ($274 \pm 20^{\circ}\cdot s^{-1}$ contre $248 \pm 32^{\circ}\cdot s^{-1}$ pour le groupe RA, $P < 0,05$) (Tableau 6.4). Ce résultat pourrait avoir un lien avec la légère augmentation de l'extension du tronc observée lors de la phase d'armé pour le SRA ($16 \pm 5^{\circ}$ contre $12 \pm 6^{\circ}$ pour le RA). Toutefois, ce résultat n'est pas significatif ($P = 0,102$). Ces deux éléments pourraient refléter au niveau des abdominaux une mise en tension excentrique (extension du tronc) et une contraction concentrique (vitesse de flexion du tronc) plus fortes pour les joueuses SRA, et donc un risque de blessures accru pour ces joueuses. Notre recueil épidémiologique n'appuie pas cette hypothèse puisque de nouveau, aucune joueuse de ce groupe n'a rapporté de blessures à cet endroit (Tableau 6.6). Concernant les blessures au niveau du dos, celles-ci sont très souvent mises en relation avec l'hyperextension du tronc pendant la phase d'armé, qui peut par exemple être à l'origine d'un phénomène d'écrasement des disques intervertébraux (Abrams et al., 2014; Di Giacomo et al., 2016; Dines et al., 2015; Ellenbecker et al., 2009; Kibler et Safran, 2005). Par ailleurs, après l'impact de balle, la flexion du tronc est freinée de manière excentrique par les muscles du dos, notamment les érecteurs du rachis (Chow et al., 2009). L'augmentation de la vitesse maximale de flexion du tronc observée avec le SRA pourrait impliquer une activation plus forte de ces muscles durant la phase de décélération du service, et donc provoquer des contraintes plus élevées sur les structures lombaires (Chow et al., 2009). De façon théorique, les phases d'armé et de décélération du service pourraient donc correspondre à des phases plus traumatisantes pour le dos avec le service SRA. Si nos données épidémiologiques ne permettent pas de conclure à une influence de la technique d'appuis sur l'incidence des blessures au dos ($P = 0,393$), nous observons malgré tout une proportion plus importante de joueuses SRA atteintes par ce type de blessure (37 % contre 22 % pour le groupe RA) (Figure 6.6).

6.4.1.3 Influence du type d'appuis sur la performance du service

6.4.1.3.1 Position de l'impact de balle

L'augmentation de la hauteur d'impact est un élément fondamental dans l'optimisation de la performance au service. En effet, un impact de balle plus élevé permet d'augmenter la marge de sécurité par rapport au filet et donc la réussite du service (Brechbuhl et al., 2001). Plusieurs études ont montré que le pourcentage de la 1^{ère} balle avoisine 60 % de réussite chez les meilleurs joueurs et joueuses quel que soit leur âge (Barnett et al., 2008; Hizan et al., 2011, 2015; Kovalchik et Reid, 2017). L'atteinte de ce critère de performance pour les jeunes joueurs n'est toutefois possible qu'à condition de limiter les stratégies offensives sur le 1^{er} service (Hizan et al., 2015). En effet, ces derniers ne peuvent pas reproduire le même type de trajectoire de balle que les adultes (contraintes de taille par rapport aux dimensions du terrain), ce qui pourrait les obliger à limiter la vitesse de leur service pour atteindre de façon constante le carré adverse (Kovalchik et Reid, 2017; Vaverka et Cernosek, 2013). La vitesse du 1^{er} service est pourtant un élément essentiel dans la performance des jeunes joueurs et joueuses élites (Ulbricht et al., 2016). Afin de produire les vitesses de balle les plus élevées possibles, l'optimisation de la hauteur de frappe constitue alors un objectif prioritaire au cours de la formation. Deux études ont montré que la hauteur de frappe augmente avec l'amélioration de l'explosivité de la poussée des jambes au service (Elliott et Wood, 1983; Girard et al., 2005). Au regard de nos résultats concernant les variables cinématiques des membres inférieurs (Tableau 6.3), nous avons envisagé une augmentation de la hauteur de l'impact avec le RA. Cette hypothèse n'est pourtant pas vérifiée puisque la hauteur d'impact relative à la taille est identique entre les groupes RA et SRA (Tableau 6.5 et Figure 6.12).

Par ailleurs, nos résultats montrent que l'amélioration de la poussée des jambes avec le RA tend à avancer l'impact de balle de 10 cm en moyenne chez les garçons comme chez les filles (Tableau 6.5 et Figure 6.12). Un impact de balle plus avancé permet, d'une part, d'atteindre des zones plus courtes dans le carré de service adverse (ouverture des angles), et d'autre part d'augmenter la marge de sécurité par rapport au filet (pourcentage de réussite). Toutefois, ces avantages paraissent relativement mineurs comparés à ceux fournis par une frappe de balle plus haute (Chow et al., 2003), et l'optimisation de la hauteur de l'impact reste l'objectif prioritaire des jeunes joueurs élites au service.

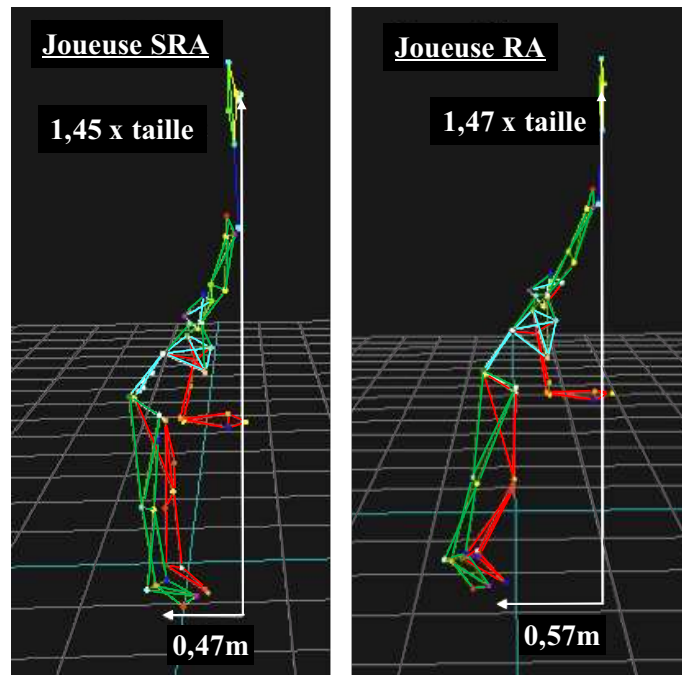


Figure 6.12 – Reconstruction 3D du service d’une joueuse SRA (à gauche) et d’une joueuse RA (à droite) au moment de l’impact de balle (vue de côté).

6.4.1.3.2 Vitesse de balle

Dans la littérature, la vitesse de rotation interne de l’épaule est considérée comme l’action qui contribue le plus à la vitesse de la raquette au service (Elliott et al., 1995; Tanabe et Ito, 2007). En accord avec les travaux de Reid et al. (2008), nos résultats montrent que cette vitesse segmentaire n’est pas influencée par le type d’appuis des jeunes joueurs élites (Tableau 6.4). D’une manière plus générale, nos résultats soulignent que la poussée des jambes plus explosive avec le RA n’améliore pas les vitesses segmentaires de la chaîne cinématique du service (Tableau 6.4). Chez les filles, la vitesse maximale de flexion du tronc est supérieure pour les joueuses SRA, mais cette vitesse ne contribuerait que faiblement à la vitesse de la raquette à l’impact (Elliott et al., 1995; Sprigings et al., 1994). Dans les deux sexes, nous ne retrouvons pas de différence dans les timings d’apparition des vitesses segmentaires maximales entre RA et SRA. Par conséquent, il nous paraît logique de retrouver une vitesse de balle identique entre les deux techniques de service (Tableau 6.5).

Nos résultats sont en accord avec les travaux d’Elliott et Wood (1983) et de Reid et al. (2008) qui n’ont pas montré de différence significative pour la vitesse du service ou pour la vitesse de la raquette avant l’impact entre les deux types d’appuis chez des joueurs adultes. De leur côté, Martin et al. (2012) ont identifié une augmentation significative de la vitesse de balle de $7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ avec le RA par rapport au SRA pour des joueurs adultes experts. La méthodologie utilisée dans ces études diffère néanmoins de la nôtre puisque les joueurs testés devaient à la fois servir avec leur type d’appuis habituel mais aussi avec celui qu’ils n’utilisaient pas en compétition, ce qui laisse supposer que l’une des deux techniques de service était mieux maîtrisée que l’autre. Notre étude est donc la première à comparer le RA et le SRA en s’intéressant uniquement à la technique préférentielle de chaque joueur et de chaque joueuse, ce qui renforce la pertinence de nos résultats.

6.4.1.4 Influence du type d'appuis sur les contraintes articulaires maximales du membre supérieur

Les contraintes articulaires maximales générées au cours d'un mouvement sportif sont utilisées dans la littérature scientifique pour prédire le risque de blessures chroniques associé à la réalisation du mouvement en question (Fleisig et al., 1995; Martin et al., 2014; Noffal et Elliott, 1998; Reid et al., 2008). Au tennis, une première étude a montré une diminution des contraintes articulaires maximales au coude et à l'épaule lors du service avec une poussée des jambes identifiée par les auteurs comme plus efficace (Elliott et al., 2003), laissant imaginer dans notre étude que les contraintes pourraient être inférieures avec le RA par rapport au SRA. Au contraire, Reid et al. (2008) ont montré que la technique des membres inférieurs n'a pas d'influence sur les contraintes générées à l'épaule au cours du service de joueurs adultes, et nos résultats chez les jeunes joueurs sont en accord avec cette étude (Figure 6.5). Chez les garçons, la force antérieure maximale au coude est significativement supérieure lors du RA (Figure 6.5), avec des valeurs pour ce groupe proches de celles obtenues par Martin et al. (2014) lors du service de joueurs professionnels adultes. Cette force est produite au coude pour résister à la translation postérieure de l'avant-bras au cours du service (Fleisig et Escamilla, 1996). Cependant, elle n'est associée à aucune pathologie dans la littérature, à la différence du moment de varus et de la force proximale du coude souvent évoqués comme causes de tendinopathies du coude (Fleisig et al., 2018; Martin et al., 2014). Dans l'ensemble, nos résultats montrent des valeurs de contraintes articulaires maximales très comparables entre RA et SRA, ce qui suggère un risque de blessures chroniques du membre supérieur identique quel que soit le type d'appuis utilisé au service (Figure 6.5). Toutefois, notre recueil épidémiologique révèle que plus de la moitié des joueurs du groupe RA (53 %) se sont blessés à l'épaule au cours de l'année précédant l'expérimentation, alors que seulement 17 % des joueurs SRA ont subi ce type de blessures sur la même période (Figure 6.6). Cette différence, qui n'est pas significative d'un point de vue statistique ($P = 0,107$), nous invite néanmoins à penser que le RA pourrait être une technique de service qui favorise le risque de blessures à l'épaule pour les jeunes joueurs élités.

6.4.2 Le mauvais relais d'appuis

6.4.2.1 Influence du mauvais relais d'appuis sur la performance au service

Nos résultats montrent que le MRA ne conduit pas à une diminution de la vitesse du service (Tableau 6.8), ce qui infirme l'hypothèse que nous avons émise au début de cette étude. De plus, alors qu'une diminution de l'explosivité de la poussée des jambes était attendue avec le MRA (Ellenbecker, 2006), nos résultats permettent d'affirmer que la qualité de la poussée des jambes ne se détériore pas avec cette organisation technique. En effet, les vitesses verticales maximales des hanches arrière et avant ne sont pas significativement différentes entre les groupes MRA et BRA (Tableau 6.6). Au regard de ces résultats, il est logique d'observer une position d'impact très similaire entre MRA et BRA, aussi bien en ce qui concerne la hauteur de frappe (1,47 fois la taille) que la position de l'impact vers l'avant (+ 56 – 57 cm) (Tableau 6.8). La position latérale de l'impact est également très comparable entre les deux groupes. De façon empirique, les entraîneurs pensent généralement qu'un lancer de balle trop vers l'avant ou trop « à droite » peut être à l'origine d'un MRA, mais nos résultats ne soutiennent pas cette hypothèse.

En revanche, le MRA tend à entraîner une diminution du vissage des hanches par rapport au filet au début de la poussée des jambes (Tableau 6.7), ce qui va dans le sens des hypothèses émises dans la littérature (Ellenbecker, 2006). Ce phénomène s'explique par la pose de l'appui arrière sur le côté ou en avant de l'appui avant lors du relais d'appuis (Tableau 6.2 et Figure 6.7). De façon logique, cette différence tend à entraîner une diminution de la vitesse maximale de rotation longitudinale des hanches pour le groupe MRA (Tableau 6.7). De plus, ces joueuses démontrent un angle de séparation au début de la poussée des jambes et un angle de séparation maximal qui tendent à être supérieurs (Tableau 6.7). Malgré cela, les joueuses avec MRA produisent une vitesse maximale de rotation longitudinale des épaules qui tend à être inférieure à celle du groupe BRA (Tableau 6.7). Afin d'optimiser le transfert d'énergie proximo-distal au sein de la chaîne cinématique du service, l'apparition de la vitesse maximale de rotation des hanches devrait intervenir avant celle des épaules (Wagner et al., 2014), ce qui se vérifie pour les joueuses du groupe BRA (Figure 6.8). En revanche, la vitesse maximale de rotation longitudinale des épaules apparaît avant la vitesse maximale de rotation longitudinale des hanches avec un MRA (Figure 6.8). L'inversion entre ces deux timings suggère un enchaînement segmentaire moins efficace pour les joueuses MRA (Kovacs et Ellenbecker, 2011), avec la rotation des hanches qui ne permettrait pas de lancer de façon optimale la rotation des épaules.

Toutefois, malgré ces observations, le MRA ne conduit pas à une diminution de la vitesse de balle par rapport au BRA (Tableau 6.8). Lors des mouvements sportifs se déroulant suivant une séquence proximo-distale comme le service, il est admis que si un segment corporel ne fonctionne pas correctement, le mouvement nécessite des compensations par les autres segments pour que celui-ci puisse rester optimale (Kovacs et Ellenbecker, 2011; Tubez et al., 2015). Par conséquent, pour parvenir à produire la même vitesse de balle que les joueuses RA, les joueuses MRA doivent théoriquement parvenir à combler le déficit de rotation des hanches par des compensations sur les segments distaux de la chaîne cinématique. L'augmentation de l'angle de séparation observée pour les joueuses MRA au début de la poussée des jambes ($P = 0,053$) semble être un premier élément de réponse, avec de façon assez intuitive un déficit de rotation des hanches qui serait compensé par une augmentation du vissage des épaules. Toutefois, la vitesse de rotation longitudinale des épaules tend à être inférieure avec le MRA (Tableau 6.7), ce qui signifie que cette compensation segmentaire n'est pas totalement suffisante. Par ailleurs, nous observons une différence dans le timing d'apparition de la vitesse maximale de rotation antéropostérieure du tronc entre les deux groupes, cette rotation intervenant significativement plus tôt lors du MRA par rapport au BRA (Figure 6.8). Pour le service de joueurs adultes, un timing plus précoce de cette vitesse segmentaire a été mis en lien avec une augmentation de la vitesse de balle au service (Martin, Kulpa, Ropars et al., 2013). De plus, la vitesse maximale de flexion du poignet tend à être supérieure pour les joueuses MRA (Tableau 6.7), et cette vitesse segmentaire contribue fortement à l'accélération de la raquette au service (Elliott et al., 1995). Pour résumer, l'augmentation de l'angle de séparation, l'augmentation de la vitesse maximale de flexion du poignet et le timing plus précoce de la vitesse maximale de rotation antéropostérieure du tronc pourraient correspondre aux 3 compensations segmentaires qui permettent aux joueuses MRA, malgré un déficit au niveau de la rotation longitudinale des hanches, de maintenir une vitesse de balle élevée et comparable à celle des joueuses BRA.

6.4.2.2 Influence du mauvais relais d'appuis sur le risque de blessures du membre supérieur dominant et du tronc

Les compensations segmentaires induites par une mauvaise technique gestuelle peuvent potentiellement créer des surcharges sur les tissus et constituent un facteur de risque de blessures (Elliott, 2006; Lintner et al., 2008). Par exemple, Martin, Kulpa, Ropars et al. (2013) ont objectivé une inversion dans l'apparition des timings de rotation longitudinale du tronc chez des joueurs adultes blessés à l'épaule par rapport à des joueurs qui n'ont subi aucune blessure de ce type. Pour expliquer les blessures à l'épaule, les auteurs ont démontré un moins bon transfert d'énergie au niveau du tronc qui a conduit, via une augmentation des contraintes articulaires sur le membre supérieur, à un phénomène de compensation. Dans notre étude, les contraintes articulaires maximales du membre supérieur sont identiques entre les joueuses BRA et MRA (Figure 6.9). Ces résultats sont surprenants, en particulier pour les valeurs de contraintes au niveau du poignet puisque la vitesse maximale de flexion du poignet a tendance à être supérieure pour les joueuses MRA (Tableau 6.7). Le recueil de blessures révèle quant à lui que 4 joueuses MRA se sont blessées à l'épaule contre une seule joueuse du groupe BRA (Figure 6.10). Cette très légère tendance ($P = 0,155$) suggérant un risque de blessures à l'épaule supérieure pour le groupe MRA devra être confirmée par une étude impliquant un plus grand nombre de joueuses.

De plus, d'après les hypothèses d'Ellenbecker (2006), le dévissage précoce des hanches au service pourrait être à l'origine d'une augmentation de l'abduction horizontale de l'épaule, qui est alors définie comme le « retard » du bras sur le tronc lors de la phase d'armé. L'auteur a supposé que ce « retard » du bras pouvait conduire à une augmentation des contraintes sur la partie antérieure de l'épaule. Dans notre étude, nous ne retrouvons pas de différence entre les joueuses BRA et MRA pour le pic de force antérieure à l'épaule (Figure 6.9), ni pour la valeur maximale d'abduction horizontale (Tableau 6.7). Néanmoins, la tendance observée concernant l'augmentation de l'angle de séparation pour les joueuses MRA nous laisse plutôt envisager un « retard » des épaules (tronc supérieur) par rapport aux hanches (tronc inférieur) (Figure 6.13). Le MRA impliquerait ainsi une mise en tension plus importante des abdominaux durant la phase d'armé (Dowling et al., 2016), avec une augmentation supposée du risque de blessures pour ces joueuses. Notre recueil de blessures, qui montre que 4 joueuses MRA ont déclaré une blessure aux abdominaux contre 2 joueuses dans le groupe BRA (Figure 6.13), devra également être complété pour explorer plus précisément le lien entre le MRA et la survenue d'une blessure aux abdominaux.



Figure 6.13 – Joueuse professionnelle avec un mauvais relais d'appuis au service (MRA), conduisant à un angle de séparation très important lorsque la raquette descend dans le dos (figure au centre), d'après Ellenbecker (2006).

Enfin, de façon intéressante, nous remarquons un élément technique commun aux 3 joueuses MRA blessées au dos au cours de notre étude. Malgré le pied arrière qui vient se positionner à côté du pied avant, ces joueuses parviennent à maintenir un vissage des hanches relativement prononcé (106° en moyenne) (Figure 6.14) par rapport aux 8 joueuses du groupe MRA qui ne se sont pas blessées au dos (76° en moyenne) (Tableau 6.9). Le vissage prononcé des 3 joueuses blessées au dos est en fait très comparable à celui des joueuses BRA (102° en moyenne). Toutefois, le fait d'avoir une « ligne de pieds » presque parallèle au filet et une « ligne de hanches » perpendiculaires au filet semble définir à une organisation technique traumatisante pour les hanches et les structures lombaires des joueuses en question.

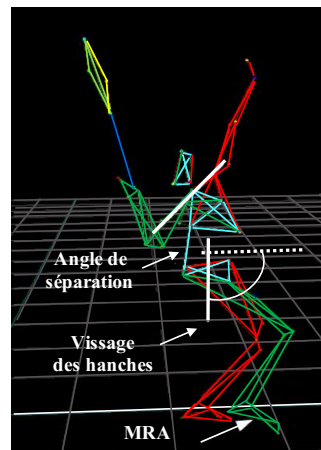


Figure 6.14 – Représentation 3D du service d'une joueuse blessée au dos, avec au début de la poussée un maintien du vissage des hanches par rapport au filet malgré un mauvais relais d'appuis et une « ligne de pied » parallèle au filet.

6.4.3 Limites

Elle étude possède certaines limites qu'il convient d'évoquer. En accord avec la littérature, nous avons utilisé la vitesse verticale maximale des hanches comme indicateur de

l'explosivité de la poussée des jambes au service (Sweeney et al., 2012; Whiteside et al., 2013). L'évaluation de la poussée des jambes devra être complétée dans une prochaine étude grâce à l'utilisation de plateformes de forces permettant la mesure des forces de réaction horizontales et verticales entre les différents types d'appuis. L'accès à ces données permettrait également d'estimer les contraintes articulaires grâce à une approche « bottom-up » de la dynamique inverse, cette dernière étant considérée comme plus précise que l'approche « top-down » que nous avons utilisée (Cahouët et al., 2002; Desjardins et al., 1998). Dans cette logique, une solution visant à utiliser les plateformes de force sans perturber le joueur (Iino et Kojima, 2012) ou sans dénaturer son mouvement devra être étudiée. Concernant les blessures, nous restons conscients que celles-ci ont une origine multifactorielle et que la technique d'appuis ne constitue pas le seul facteur à prendre en compte pour expliquer leur survenue. En outre, notre étude ne nous permet pas d'avoir une idée sur l'évolution de la technique d'appuis au cours de l'année précédant la capture de mouvement, c'est-à-dire sur la période de notre recueil de blessures. La mise en place d'un suivi longitudinal des joueurs permettrait de faire face à ces limites et nous permettrait d'améliorer la précision de nos données sur les blessures (Krosshaug et al., 2005). Par ailleurs, nous nous sommes intéressés aux valeurs maximales des contraintes articulaires au cours du service pour estimer le risque de blessures du membre supérieur de chaque groupe (Chu et al., 2009; Davis et al., 2009; Elliott et al., 2003; Martin et al., 2014). Dans une prochaine étude, une analyse de l'évolution des contraintes articulaires au cours du mouvement nous permettrait de mieux comprendre le risque de blessures associé à chaque type d'appuis. Enfin, l'exploration des conséquences biomécaniques du MRA chez les garçons impliquera le recrutement d'un plus grand nombre de joueurs.

6.4.4 Applications pratiques pour les entraîneurs

D'une manière générale, les résultats de cette étude doivent alerter les entraîneurs sur le bien-fondé d'une modification d'un service SRA vers un service RA en cours de formation. De notre point de vue, le choix du type d'appuis doit être guidé par les considérations suivantes.

Premièrement, le SRA est une technique de service plus simple, qui permet d'éviter les erreurs techniques concernant les membres inférieurs et qui permet d'atteindre les mêmes performances que le service RA.

Deuxièmement, le travail du service RA peut être envisagé pour améliorer l'explosivité de la poussée des jambes à la seule condition d'avoir objectivé une hauteur d'impact insuffisante avec le SRA. Les résultats obtenus dans l'étude 1 montrent que la hauteur de frappe des jeunes joueurs élites, garçons ou filles, représente de façon systématique entre 1,45 et 1,48 fois la taille du joueur.

Troisièmement, puisque les performances sont équivalentes entre le RA et le SRA, les sensations personnelles du joueur doivent rester le premier critère à prendre en compte concernant le choix du type d'appuis. À cette fin, l'entraîneur doit pouvoir proposer au cours de la formation, et même lorsqu'une technique d'appuis semble plutôt maîtrisée, différentes situations d'apprentissage pour que le jeune joueur puisse appréhender et se familiariser avec les deux types d'appuis au service.

Dernièrement, les conséquences biomécaniques du RA et du SRA et leurs liens avec les problématiques de blessures constituent un élément de réflexion dans le choix du type d'appuis. Notre étude nécessite des investigations complémentaires pour identifier plus précisément le

risque de blessures associé au RA et au SRA. Toutefois, plusieurs éléments attirent notre attention et peuvent être intégrés dans la réflexion de l'entraîneur :

- Les joueurs et les joueuses SRA sont en proportion deux fois plus nombreux à avoir rapporté une blessure au dos que ceux des groupes RA. Chez les filles, l'extension du dos au cours de la phase d'armé a tendance à augmenter avec le SRA et constitue un élément à surveiller pour un entraîneur. De plus, le SRA conduit à une augmentation de la vitesse de flexion du tronc au cours du service. Par conséquent, un renforcement excentrique des muscles extenseurs du tronc, qui sont impliqués dans le freinage du tronc après l'impact, doit être préconisé plus spécifiquement pour ces joueuses.
- Chez les garçons, 50 % des joueurs RA ont déclaré une blessure à l'épaule contre 17 % des joueurs SRA.
- Chez les filles, environ 25 % des joueuses utilisant un RA ont rapporté au moins une blessure aux abdominaux, alors qu'aucune joueuse utilisant un SRA n'a été affectée par ce type de blessures. Lors de la phase d'armé du service, la dissociation trop précoce des épaules par rapport aux hanches semble être un élément à surveiller lors du service RA.
- Par rapport aux joueuses BRA, les joueuses utilisant un MRA ont été plus nombreuses à se blesser à l'épaule (36 % contre 8 % pour le BRA), aux abdominaux (36 % contre 7 %) et au dos (27 % contre 17 %). Ces données, associées à celles de l'analyse cinématique du service, suggèrent une technique de service qui doit être corrigée pour préserver l'intégrité physique de la joueuse.

6.5 Conclusion

La question d'enseigner au jeune joueur un service avec relais d'appuis (RA) ou sans relais d'appuis (SRA) est une problématique récurrente pour un entraîneur. Cette étude vise à apporter des réponses concrètes à ce sujet en s'intéressant chez les jeunes joueurs élites à l'influence du type d'appuis sur la performance au service et sur le risque de blessures, ce qui n'a jamais été investigué auparavant. En outre, cette étude est la première à comparer le RA et le SRA en se focalisant uniquement sur la technique préférentielle de chaque joueur. Un résultat majeur de cette étude révèle qu'entre 12 et 16 ans, la performance au service des joueurs et des joueuses élites n'est pas influencée par le type d'appuis. Si le RA favorise l'explosivité de la poussée des jambes au service, cette amélioration n'a aucune incidence sur la vitesse de balle ou la hauteur de l'impact, deux éléments clés de la performance au service. De plus, l'analyse dynamique ne révèle aucune différence concernant les contraintes articulaires maximales du membre supérieur entre le RA et le SRA, définissant ainsi deux techniques de service comparables en ce qui concerne le risque de blessures à l'épaule, au coude et au poignet. Nous avons également comparé chez les filles deux réalisations techniques différentes du service RA. Celles-ci se distinguent par le positionnement du pied arrière avant la flexion des jambes : derrière le pied avant (BRA) ou à côté voire devant le pied avant (MRA). Le MRA, souvent considéré par les entraîneurs comme une erreur technique du service, n'a jamais été étudié dans la littérature. Aucune dégradation de la performance n'est retrouvée avec cette technique de service par rapport au BRA. Toutefois, nos résultats suggèrent avec le MRA un déficit de rotation au niveau des hanches qui semble ensuite entraîner plusieurs compensations segmentaires au niveau du tronc et du membre supérieur. L'une de ces compensations fait

référence à une augmentation du vissage des épaules au cours de la phase d'armé, ce qui pourrait refléter une organisation technique plus traumatisante pour le tronc et l'épaule de la joueuse. D'autres investigations devront être conduites pour confirmer certaines tendances observées dans cette étude, notamment en ce qui concerne la localisation des blessures en fonction du type d'appuis utilisé. En conclusion, nos résultats invitent à reconsidérer l'utilisation très majoritaire du service RA au cours de la formation, avec le SRA qui se révèle être une technique de service simple, performante, et qui limite le risque d'erreurs techniques au niveau des membres inférieurs.

Chapitre 7

Étude 3 : Analyse biomécanique du service en plateau sur les contraintes articulaires du membre supérieur chez les jeunes joueurs élités

Touzard, P., Kulpa, R., Bideau, B., Montalvan, B. et Martin, C. (2019). Biomechanical analysis of the “waiter’s serve” on upper limb loads in young elite tennis players. *European Journal of Sport Science*, 19(6), 765–773.

Touzard, P., Kulpa, R., Bideau, B., Montalvan, B. et Martin, C. (2017). Biomechanical analysis of tennis serve in young elite players: effect of the « waiter’s serve » on upper limb loads [communication orale]. 22nd Annual Congress of the European College of Sport Science, Essen, Germany.

7.1 Introduction

Les études épidémiologiques indiquent que les blessures chroniques du joueur de tennis concernent davantage le membre supérieur, et l'étiologie de ces blessures est considérée comme multifactorielle (Abrams et al., 2012; Pluim et Staal, 2010). Parmi ces facteurs, les contraintes articulaires excessives peuvent constituer une cause de ces blessures (Abrams et al., 2014; Elliott et al., 2003; Martin et al., 2014; Reid, Elliott et Alderson, 2007). Plusieurs études ont montré que les joueurs subissent d'importantes contraintes articulaires sur le membre supérieur lors du service (Abrams et al., 2014; Elliott et al., 2003; Martin et al., 2014), et que ces contraintes peuvent être considérées comme dangereuses pour leur intégrité physique (Dillman et al., 1995). Ainsi, il semble pertinent de penser que les joueurs qui subissent les contraintes articulaires les plus élevées lors du service sont aussi ceux qui auront le plus de risques de se blesser (Reid, Elliott et Alderson, 2007). Deux études s'intéressant au lancer au baseball (Anz et al., 2010) et au service au tennis (Martin, 2013) ont confirmé cette hypothèse en démontrant que les joueurs qui génèrent les contraintes articulaires les plus fortes se blessent davantage que les autres joueurs. De façon intéressante, certaines erreurs techniques lors de la réalisation du service sont à l'origine d'une augmentation des contraintes articulaires sur le membre supérieur (Elliott et al., 2003; Martin, Kulpa, Ropars et al., 2013). Dans la mesure où elles n'induisent aucune augmentation de la vitesse de balle, ces erreurs techniques ont été définies comme des facteurs « pathomécaniques » dans la littérature (Fortenbaugh et al., 2009; Martin, Kulpa, Ropars et al., 2013). Les études qui ont cherché à mesurer les contraintes articulaires pour identifier les erreurs techniques du service se sont presque exclusivement centrées sur les joueurs adultes (Abrams et al., 2014; Elliott et al., 2003; Martin et al., 2014; Reid, Elliott et Alderson, 2007). Cependant, il semble que les jeunes joueurs méritent une attention toute particulière puisque les erreurs techniques sont souvent plus nombreuses dans cette population en pleine période de formation et d'apprentissage sur le plan biomécanique.

Le service en plateau, qui correspond à une raquette orientée vers le ciel lors de la descente de la raquette dans le dos, est l'une de ces erreurs techniques couramment rencontrée sur le terrain (Smith, 2004; Williams et Petersen, 2000). À titre d'exemple, Novak Djokovic (actuel n°1 mondial) utilisait cette organisation lors de ses débuts sur le circuit professionnel, avant de procéder à une modification technique en cours de carrière pour corriger ce défaut (Figure 7.1). Les résultats de l'étude 1 de ce travail de thèse ont montré que le service en plateau était davantage présent chez les garçons que chez les filles et chez les jeunes joueurs que chez les adultes. À l'heure actuelle, aucune étude scientifique ne s'est intéressée à l'influence du service en plateau sur la performance et les risques de blessures associés.

Les objectifs de cette étude sont :

- (a) de déterminer si le service en plateau peut être considéré comme un facteur pathomécanique chez le jeune joueur élite,
- (b) d'identifier les causes cinématiques de cette organisation technique,
- (c) de discuter des potentiels risques de blessure qui lui sont associés.

Nous supposons que le service en plateau engendre des vitesses de balles inférieures et / ou des contraintes articulaires supérieures. Nous formulons également l'hypothèse que celui-ci s'explique par une extension du poignet plus importante lors de la descente de la raquette dans le dos du joueur.



Figure 7.1 – Modification de la technique de service de Novak Djokovic entre 2010 (service en plateau, à gauche) et 2013 (service normal, à droite).

7.2 Méthodologie générale

La méthodologie concernant la capture de mouvement, le protocole expérimental, l'enregistrement de la vitesse de balle, le calcul des données cinématiques et des contraintes articulaires est identique à celle présentée dans le chapitre 4 de ce travail.

7.2.1 Participants de l'étude

18 jeunes joueurs de tennis, faisant partie des 10 meilleurs joueurs de leur année d'âge en ce qui concerne le classement Français (classés entre 4/6 et 1/6), ont été intégrés dans cette étude (âge : $13,9 \pm 0,7$ ans, taille : $1,72 \pm 0,08$ m, masse : $59,1 \pm 7,5$ kg). Tous les joueurs étaient impliqués dans un programme d'entraînement coordonné par la Fédération Française de Tennis (FFT). Au moment de l'expérimentation, les joueurs étaient en bonne santé, et aucun ne présentait d'antécédent d'intervention chirurgicale au niveau du bras dominant.

7.2.2 Le service en plateau

La position de service en plateau est observée pendant la phase d'armé, plus précisément lorsque le joueur accélère sa raquette vers le bas et derrière le tronc. Nous avons défini le « moment du plateau » (MDP) comme le moment où l'axe longitudinal de la raquette (Y1) est parallèle au sol. Pour les joueurs avec une organisation en plateau, l'axe transverse de la raquette (X1) tend à être parallèle au sol au MDP (Figure 7.2 et Figure 7.3).

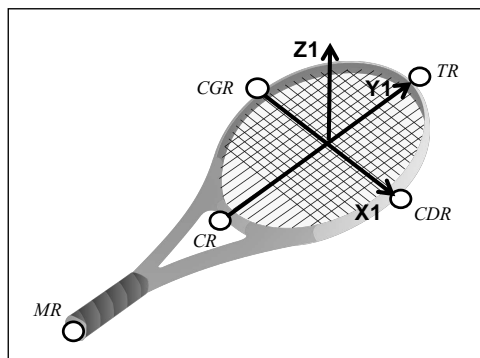


Figure 7.2 – Axes de la raquette. X1 : axe transverse, Y1 : axe longitudinal, Z1 : axe perpendiculaire ou normal, MR : extrémité du manche de la raquette, CR : cœur de la raquette, TR : tête de la raquette, CGR et CDR : côtés gauche et droit du tamis de la raquette.

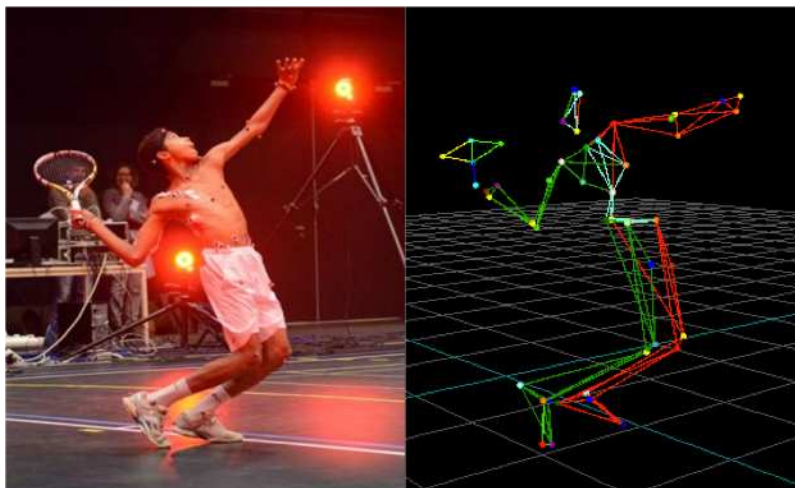


Figure 7.3 – Représentation d'un joueur avec un service en plateau.

Deux entraîneurs expérimentés ont formé deux groupes parmi les 18 participants : les joueurs qui servaient avec un plateau ont été placés dans le groupe « plateau » (n = 10), tandis que les autres joueurs ont été rassemblés dans le groupe « normal » (n = 8). Afin de valider la composition des deux groupes, l'angle relatif entre l'axe transverse de la raquette et l'axe horizontal a été relevé au MDP (angle θ , Figure 7.4). Tous les services ont été normalisés par rapport à l'impact de balle, qui a été identifié visuellement et vérifié grâce à la vitesse horizontale de la tête de raquette (Wagner et al., 2014). Les mesures ont été conduites de 0,5 s avant l'impact jusqu'à 0,1 s après l'impact, et les timings ont été calculés par rapport à l'impact (les valeurs négatives indiquent un évènement qui précède la frappe de balle). Les angles de rotation externe de l'épaule, d'abduction de l'épaule, d'abduction horizontale de l'épaule, de flexion du coude et d'extension du poignet ont été calculés durant l'intervalle de mesure. Les valeurs au MDP ainsi que les valeurs maximales de ces angles (valeur minimale pour l'abduction de l'épaule), avec leur timing relatif par rapport à l'impact de balle ont été enregistrés.

Techniquement, la prise de raquette dépend du positionnement de l'index et de l'éminence hypothénar sur le manche de la raquette (Tagliafico et al., 2009). Pour les besoins de l'étude, la prise de raquette des joueurs a été estimée comme l'angle relatif entre la main et la raquette au MDP. Dans le référentiel de la main, l'axe transverse de la main (X2) est déterminé par le vecteur reliant le processus styloïde de l'ulna avec le processus styloïde du radius. L'axe longitudinal de la main (Y2) représente le vecteur reliant le milieu des deux processus styloïdes avec la base du troisième métacarpien. Enfin, l'axe sagittal de la main a été déterminé comme le produit vectoriel de X2 et Y2. En ce qui concerne le référentiel raquette, nous avons déterminé le vecteur Z1, produit vectoriel des vecteurs X1 et Y1 décrits précédemment (Figure 7.2). Enfin, l'estimation de la prise de raquette du joueur correspond à l'angle relatif entre Z1 et Z2 (Figure 7.4).

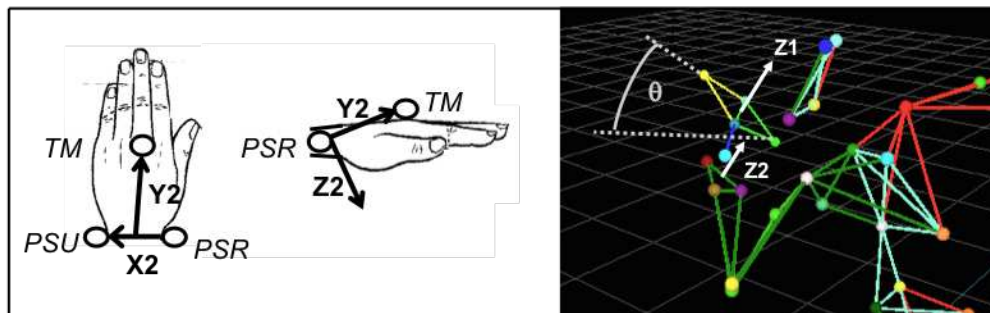


Figure 7.4 – Représentation du repère de la main (à gauche), du calcul de la prise de raquette et de l'angle de la raquette (à droite).

7.2.3 Recueil des données sur les blessures

Pour tous les joueurs, les données sur les blessures ont été recueillies par le médecin du centre national d'entraînement de Poitiers sur une période d'un an à partir de la capture de mouvement. La blessure a été définie en accord avec le consensus d'un groupe d'experts en épidémiologie du tennis (Pluim et al., 2009). Pour chaque joueur, le médecin a indiqué le nombre, le nom, la localisation, le type de blessure (aigüe ou chronique) ainsi que la sévérité de la blessure (nombre de jours écoulés entre la blessure et le retour à 100 % à l'entraînement).

7.2.4 Analyses statistiques

Les valeurs moyennes et les écarts-types (5 essais par joueur) ont été calculés pour chacune des variables cinématiques et dynamiques. En fonction de la normalité des distributions, des tests de Student ou des tests de Mann Whitney pour échantillons non appariés ont été utilisés pour comparer les données entre les deux groupes. Le niveau de significativité a été fixé à $P < 0,05$ (SPSS Version 20; Chicago, IL, USA). Les « effect size » ont été calculés pour renseigner la taille des effets statistiques observés et définis comme petit pour $d > 0,1$, moyens pour $d > 0,3$ et grands pour $d > 0,5$ (Cohen, 1988). Un test exact de Fisher a été utilisé pour déterminer l'effet du service en plateau sur l'incidence et la sévérité des blessures du membre supérieur.

7.3 Résultats

Il n'existe aucune différence statistique entre les deux groupes concernant les données anthropométriques, la vitesse de balle au service et les caractéristiques des raquettes (Tableau 7.1).

	Plateau (n = 10)	Normal (n = 8)	P	Effect size
Caractéristiques des sujets				
Age (ans)	13,9 ± 0,6	14,0 ± 0,9	0,881	0,131
Taille (m)	1,71 ± 0,07	1,74 ± 0,10	0,504	0,323
Masse (kg)	57,6 ± 6,9	60,9 ± 8,3	0,372	0,432
Vitesse de balle (km·h ⁻¹)	159,4 ± 8,6	160,7 ± 11,8	0,805	0,126
Caractéristiques des raquettes				
Masse (kg)	0,309 ± 0,008	0,302 ± 0,010	0,109	0,773
I _T (kg·m ²)	0,015 ± 0,001	0,015 ± 0,001	0,359	0,471
I _N (kg·m ²)	0,017 ± 0,001	0,016 ± 0,001	0,369	0,453
I _L (kg·m ²)	0,001 ± 0,000	0,001 ± 0,000	0,878	0,099
Centre de masse (m)	0,329 ± 0,005	0,330 ± 0,002	0,728	0,262

Tableau 7.1 – Comparaison des données anthropométriques, de la vitesse de balle et des caractéristiques des raquettes entre les deux groupes.

7.3.1 Contraintes articulaires maximales du membre supérieur

Le Tableau 7.2 présente pour les deux groupes les valeurs maximales de contraintes générées au niveau des articulations du membre supérieur lors du service. Les résultats montrent que 4 des 14 variables dynamiques mesurées sont supérieures pour le groupe plateau. Plus précisément, le moment de rotation interne de l'épaule ($P < 0,05$), le moment de varus au coude ($P < 0,01$) et les forces proximale et antérieure au poignet ($P < 0,05$) sont significativement plus élevés pour ce groupe. Tous ces résultats présentent des « effect size » définis comme larges ($d > 0,5$).

	Plateau (n = 10)	Normal (n = 8)	P	Effect size
Force à l'épaule (N·kg⁻¹)				
Force proximale	5,3 ± 0,7	5,1 ± 0,6	0,634	0,233
Force antérieure	2,8 ± 0,4	2,9 ± 0,6	0,490	0,328
Force inférieure	2,7 ± 0,5	2,7 ± 0,3	0,656	0,221
Moment de force à l'épaule (N·m·kg⁻¹·m⁻¹)				
Moment de rotation interne	57,2 ± 4,9*	51,4 ± 4,2	0,030	1,127
Moment d'adduction	47,3 ± 5,8	51,2 ± 6,3	0,189	0,647
Moment d'adduction horizontale	39,2 ± 5,7	39,3 ± 3,9	0,829	0,020
Moment d'abduction horizontale	28,8 ± 6,1	25,4 ± 4,2	0,274	0,649
Force au coude (N·kg⁻¹)				
Force proximale	5,5 ± 0,7	4,9 ± 0,5	0,068	0,949
Force antérieure	1,5 ± 0,2	1,6 ± 0,2	0,211	0,612
Force médiale	2,3 ± 0,2	2,4 ± 0,3	0,360	0,529
Moment de force au coude (N·m·kg⁻¹·m⁻¹)				
Moment de varus	58,9 ± 4,9**	52,0 ± 5,0	0,009	1,398
Force au poignet (N·kg⁻¹)				
Force proximale	3,5 ± 0,5*	3,0 ± 0,2	0,035	1,128
Force antérieure	3,0 ± 0,2*	2,7 ± 0,4	0,033	1,076
Force médiale	0,9 ± 0,1	0,9 ± 0,1	0,658	0,217

Tableau 7.2 – Valeurs maximales des contraintes articulaires du membre supérieur entre les deux groupes. ** : P < 0,01, * : P < 0,05. Les variables en gras tendent à être différentes (0,05 < P < 0,1). N : Newton.

7.3.2 Blessures

Parmi tous les participants de l'étude, 17 joueurs se sont blessés durant l'année suivant la capture de mouvement, pour un total de 81 blessures. Plus précisément, 12 joueurs se sont blessés au niveau du membre supérieur dominant, dont 9 joueurs contractant au moins une tendinopathie de l'épaule (15 blessures au total), 7 joueurs avec au moins une tendinopathie du coude (10 blessures au total) et deux joueurs avec une tendinopathie du poignet (2 blessures). Aucune différence significative concernant l'incidence ou la sévérité des blessures n'apparaît entre les deux groupes. Cependant, les joueurs du groupe plateau semblent subir davantage de blessures au coude que les joueurs du groupe normal (P = 0,07 ; d = 0,397). Le nombre de joueurs blessés au niveau du membre supérieur dominant, le nombre total de blessures chroniques du membre supérieur dominant et le nombre moyen de jours d'arrêts par blessure sont détaillés dans le Tableau 7.3.

	Plateau (n = 10)	Normal (n = 8)	P	Effect size
Épaule				
Nombre de joueurs blessés (%)	5 (50)	4 (50)	0,945	0
Nombre total de blessures (%)	9 (20,9)	6 (15,8)	0,717	0,134
Durée moyenne de la blessure, en jours	9,4 ± 11,8	10,7 ± 13,1	0,755	0,098
Coude				
Nombre de joueurs blessés (%)	4 (40)	3 (37,5)	0,827	0,150
Nombre total de blessures (%)	7 (16,3)	3 (7,9)	0,072	0,397
Durée moyenne de la blessure, en jours	6,7 ± 7,3	2,7 ± 2,5	0,219	0,738
Poignet				
Nombre de joueurs blessés (%)	1 (10)	1 (12,5)	0,738	0,075
Nombre total de blessures (%)	1 (2,3)	1 (2,6)	0,738	0,060
Durée de la blessure, en jours	8	5	/	/

Tableau 7.3 – Récapitulatif du nombre de joueurs blessés (% de joueurs dans le groupe), du nombre total de blessures (% des blessures dans le groupe) et de la durée moyenne d'arrêt par blessure pour chaque articulation du membre supérieur. Les variables en gras tendent à être différentes ($0,05 < P < 0,1$).

7.3.3 Variables cinématiques

Les variables cinématiques calculées au MDP, ainsi que les valeurs maximales de ces variables avec leur timing relatif par rapport à la frappe de balle ont été synthétisées dans le Tableau 7.4. L'angle relatif entre l'axe transverse de la raquette et l'axe horizontal (angle θ) est significativement inférieur pour le groupe plateau, validant la constitution des deux groupes par les expérimentateurs. Pour les joueurs du groupe plateau, l'extension du poignet est significativement plus importante au MDP ($36 \pm 14^\circ$ contre $23 \pm 10^\circ$; $P < 0,05$; $d = 1,051$). Cette augmentation de l'extension du poignet semble persister jusqu'à la fin de la phase d'armé pour le groupe plateau, car une tendance à la différence est observée ($58 \pm 10^\circ$ contre $50 \pm 7^\circ$; $P = 0,08$). De plus, l'abduction de l'épaule est significativement inférieure pour les joueurs du groupe plateau au MDP ($50 \pm 11^\circ$ contre $64 \pm 10^\circ$; $P < 0,05$; $d = 0,980$). Ces résultats obtenus au MDP sont très similaires par rapport à ceux obtenus pour la mesure de l'angle d'abduction minimale puisque ces deux évènements sont temporellement très proches ($48 \pm 13^\circ$ vs. $62 \pm 10^\circ$; $P < 0,05$; $d = 1,234$). Aucune différence n'apparaît entre les deux groupes concernant l'estimation de la prise de raquette, la flexion du coude, la rotation externe de l'épaule, l'abduction horizontale de l'épaule, à la fois pour les valeurs maximales et pour les valeurs au MDP. De plus, le service des deux groupes est temporellement très similaire puisqu'aucune différence n'est observée concernant les différents timings analysés. L'évolution des différentes variables cinématiques au cours du service est présentée sur la Figure 7.5, à l'exception de l'évolution de la flexion du coude, très similaire entre les deux groupes. Même si aucune différence significative n'est présente entre les deux groupes concernant la rotation externe de l'épaule au cours du service, il paraît important de souligner que cette rotation semble limitée pour les joueurs du groupe plateau avant le MDP (15 à 20°), précisément lorsque le bras est placé en abduction horizontale (0,5 à 0,3 s avant l'impact de balle).

	Plateau (n = 10)	Normal (n = 8)	P	Effect size
Données cinématiques à MDP				
Timing (s)	-0,21 ± 0,02	-0,21 ± 0,03	0,652	0,209
Angle θ (°)	19 ± 12***	48 ± 9	<0,001	1,020
Estimation de la prise de raquette (°)	39 ± 8	47 ± 11	0,282	0,201
Extension du poignet (°)	36 ± 14*	23 ± 10	0,045	1,051
Flexion du coude (°)	61 ± 14	59 ± 9	0,744	0,031
Rotation externe de l'épaule (°)	148 ± 13	145 ± 20	0,725	0,019
Abduction horizontale de l'épaule (°)	-17 ± 8	-15 ± 9	0,628	0,125
Abduction de l'épaule (°)	50 ± 11*	64 ± 10	0,014	0,980
Angles maximaux / minimaux et timings associés				
Extension maximale du poignet (°)	58 ± 10	50 ± 7	0,084	0,897
Timing de l'extension maximale du poignet (s)	-0,11 ± 0,02	-0,10 ± 0,02	0,250	0,553
Flexion maximale du coude (°)	56 ± 14	56 ± 9	0,928	0,042
Timing de la flexion maximale du coude (s)	-0,19 ± 0,05	-0,20 ± 0,02	0,522	0,324
RME de l'épaule (°)	175 ± 3	176 ± 3	0,711	0,184
Timing de la RME de l'épaule (s)	-0,08 ± 0,02	-0,08 ± 0,02	0,333	0,503
Abduction horizontale maximale de l'épaule (°)	13 ± 12	9 ± 11	0,520	0,418
Timing de l'abduction horizontale maximale de l'épaule (s)	-0,40 ± 0,07	-0,45 ± 0,05	0,130	0,736
Abduction minimale de l'épaule (°)	48 ± 13*	62 ± 10	0,021	1,234
Timing de l'abduction minimale de l'épaule (s)	-0,23 ± 0,03	-0,21 ± 0,04	0,354	0,451

Tableau 7.4 – Comparaison des variables cinématiques obtenues pour les deux groupes lors du service. *** : P < 0,001, ** : P < 0,01, * : P < 0,05. Les variables en gras tendent à être différentes (0,05 < P < 0,1). MDP : Moment du plateau, RME : rotation maximale externe.

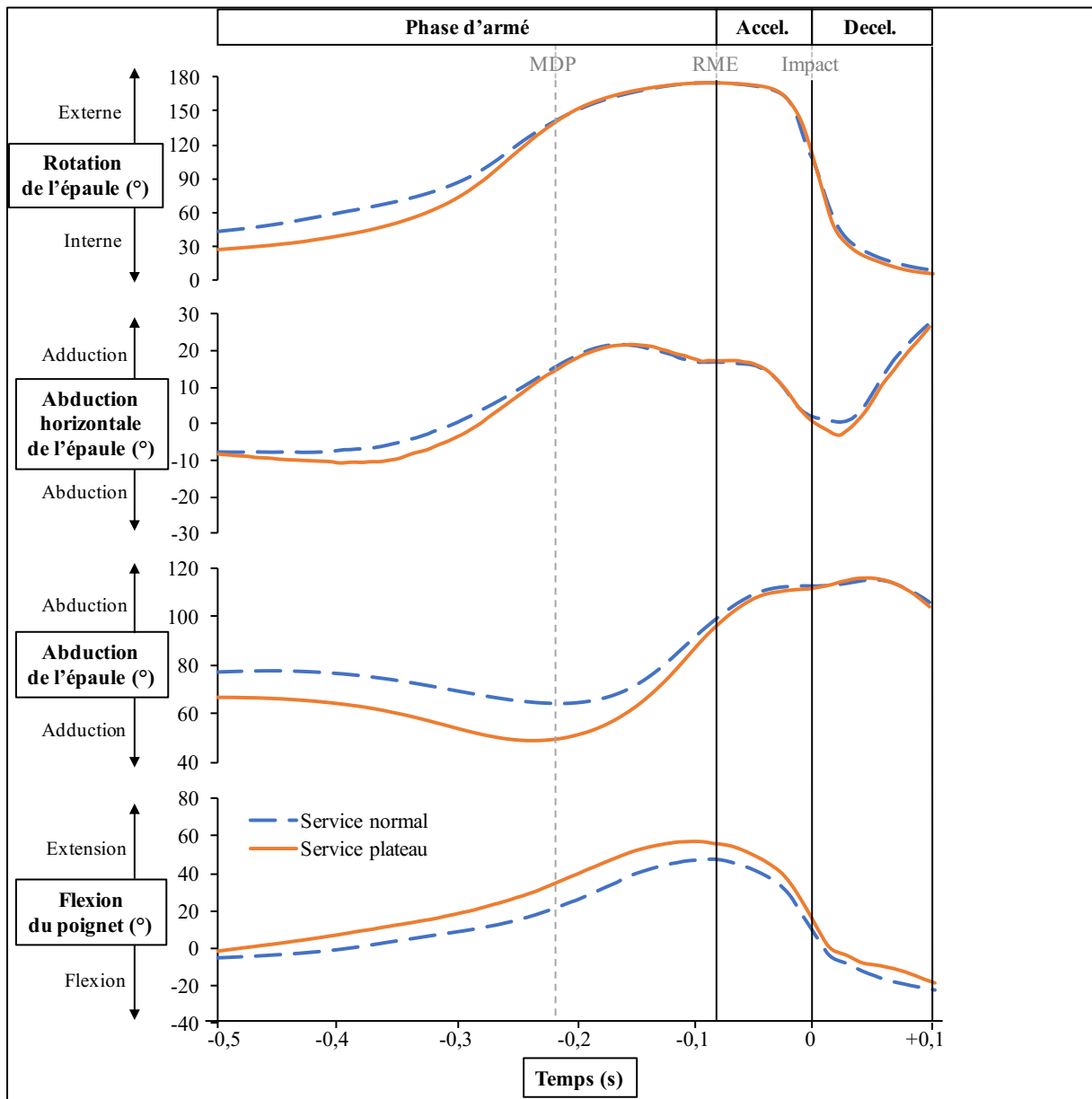


Figure 7.5 – Moyenne de la rotation externe / rotation interne de l'épaule, de l'abduction horizontale / adduction horizontale de l'épaule, de l'abduction / adduction de l'épaule et de la flexion / extension du poignet entre les deux groupes pendant le mouvement de service. ACC : phase d'accélération, DÉC : phase de décélération, MDP : moment du plateau, RME : rotation maximale externe de l'épaule.

7.4 Discussion

Sur le terrain, le service en plateau est souvent considéré comme une erreur technique par les entraîneurs de tennis. Cependant, très peu d'informations émergent de la littérature concernant cette organisation technique (Smith, 2004; Williams et Petersen, 2000), et aucune étude biomécanique ne s'est intéressée aux conséquences de celle-ci sur la performance au service ou sur les risques de blessures associés. Les objectifs de cette étude étaient de déterminer si le service en plateau peut être considéré comme un facteur pathomécanique chez les jeunes

joueurs élite, d'identifier les variables cinématiques à l'origine de cette organisation, et de discuter de son implication sur les blessures chroniques du membre supérieur.

7.4.1 Contraintes articulaires maximales et risques de blessures

7.4.1.1 Contraintes articulaires au poignet

Le joueur de tennis est soumis à des contraintes répétitives au niveau du poignet, pouvant être à l'origine de ténosynovite, de lésions du complexe triangulaire fibro-cartilagineux ou de tendinopathies des fléchisseurs et des extenseurs ulnaires du carpe (Parmelee-Peters et Eathorne, 2005). Nos résultats montrent une augmentation des valeurs maximales de forces antérieure et proximale au poignet pour le groupe plateau (Tableau 7.2), suggérant un risque traumatique pour les joueurs de ce groupe. Cependant, nos résultats ne montrent aucune différence dans la survenue des blessures au poignet entre les deux groupes. Les blessures au poignet sont assez rares dans notre population (2,5 % des blessures sur l'année) (Tableau 7.3). Ce taux de blessures est en accord avec les études de Reece et al. (1986) et de Safran et al. (1999), et il est légèrement inférieur à celui rapporté dans l'étude de Plum et al. (2016) dans laquelle les blessures au poignet représentaient 9,1 % des blessures chroniques totales subies par le jeune joueur élite.

7.4.1.2 Contraintes articulaires au coude

Lors du service, un moment de varus au coude est généré juste après la rotation maximale externe de l'épaule pour s'opposer à l'ouverture du coude en valgus (Fleisig et al., 1995; Hurd et Kaufman, 2012). Durant la phase d'accélération, le joueur est ainsi soumis au syndrome de valgus extension, défini comme la combinaison du moment de varus au coude et de l'extension violente du coude. Ce syndrome peut entraîner des contraintes de distraction le long du ligament collatéral ulnaire, des contraintes de compression sur la partie latérale du coude ainsi que des contraintes de cisaillement sur le compartiment postérieur (Cain et al., 2003; Eygendaal et al., 2007).

Nos résultats montrent des valeurs de moment de varus au coude supérieures pour le groupe plateau (Tableau 7.2). Cela amène à supposer que cette organisation technique augmente le risque de blessures sur cette articulation. Pour des joueuses de baseball professionnelles, Azuma et al. (2016) ont montré une relation significative entre l'augmentation du moment de varus au coude et la diminution de l'abduction de l'épaule au début de la phase d'armé du lancer. Si nos résultats semblent être en accord avec ceux de cette étude (Tableau 7.4 et Figure 7.5), de futurs travaux devront être menés pour déterminer plus précisément l'influence de l'amplitude d'abduction de l'épaule pendant la phase d'armé du service sur les contraintes articulaires et le risque de blessures chroniques du coude. Nos résultats révèlent également que le groupe plateau possède une extension du poignet plus importante que le groupe normal lors de la phase d'armé (Tableau 7.4 et Figure 7.5). Dans la littérature, le muscle fléchisseur ulnaire du carpe est décrit comme un stabilisateur dynamique important contre le moment de varus au coude (Dillman et al., 1995). Inversement, une étude menée sur des cadavres a souligné que la contraction des muscles extenseurs du poignet tend à augmenter les contraintes sur le ligament collatéral ulnaire (Lin et al., 2007). Par conséquent, l'extension plus prononcée du poignet pour le groupe plateau pourrait être responsable d'une limitation de la stabilisation dynamique du

coude et d'une augmentation du moment de varus au coude, impliquant un risque supérieur de blessures chroniques au niveau de cette articulation.

Toutefois, l'absence de différence significative concernant l'incidence ou la sévérité des blessures au coude (Tableau 7.3) nous empêche d'établir une relation claire entre le service en plateau et le risque de blessures sur cette articulation. Il est important de souligner malgré tout que le nombre de blessures au coude tend à être supérieur pour le groupe plateau (7 blessures contre 3 blessures, $P = 0,07$), et ces blessures semblent également plus sévères (6,7 jours d'arrêt contre 2,7 jours d'arrêt, $P = 0,22$).

7.4.1.3 Contraintes articulaires à l'épaule

Une attention particulière doit être accordée à l'épaule du jeune joueur de tennis dans la mesure où cette articulation est souvent décrite comme l'une des plus touchées au sein de cette population (Gescheit et al., 2018; Pluim et al., 2016; Reece et al., 1986; Safran et al., 1999). Dans notre étude, 50 % des joueurs ont développé une blessure à l'épaule durant l'année suivant la capture de mouvement, représentant 18,5 % du nombre de blessures total. Lors du service, la vitesse maximale de rotation interne peut dépasser $2500^{\circ}\cdot s^{-1}$ (Abrams et al., 2014; Fleisig et al., 2003; Wagner et al., 2014), et cette action est souvent considérée comme celle qui contribue le plus à la vitesse de la raquette à l'impact de balle (Elliott et al., 1995; Sprigings et al., 1994; Tanabe et Ito, 2007). Pour produire cette action violente, le joueur utilise le cycle « étirement – raccourcissement » des muscles rotateurs internes en plaçant préalablement son épaule en position de RME (Elliott, 2006). Ainsi, le pic du moment de rotation interne lors du service intervient juste avant la RME, résultat de la contraction excentrique des muscles antérieurs de l'épaule pour freiner la rotation externe puis de la contraction concentrique de ces muscles pour initier le mouvement de rotation interne (Elliott, 2006; Fleisig et al., 1995). Des tensions sont alors créées sur la partie antérieure de l'articulation glénohumérale et peuvent conduire à une instabilité antérieure de l'épaule (Hurd et Kaufman, 2012). Nos résultats démontrent que le plateau engendre un moment de rotation interne à l'épaule supérieur (Tableau 7.2), ce qui laisse supposer un risque de blessures plus important sur cette articulation. Une fois encore, cette hypothèse n'est pas confirmée par nos données épidémiologiques (Tableau 7.3), puisqu'aucune différence n'apparaît entre les deux groupes concernant les blessures à l'épaule.

7.4.2 Variables cinématiques

Le deuxième objectif de cette étude était d'investiguer et de comparer les variables cinématiques du service entre les deux groupes, dans le but de comprendre les éléments biomécaniques à l'origine du service en plateau, et donc de fournir des informations aux entraîneurs pour corriger cette erreur.

7.4.2.1 Mouvements du membre supérieur

L'abduction, l'abduction horizontale et la rotation de l'épaule sont des actions intimement liées les unes aux autres durant les mouvements du bras (Eckenrode et al., 2009; Inui et al., 2009). La réduction de l'abduction de l'épaule retrouvée pour les joueurs du groupe plateau pourrait être à l'origine d'une restriction de la rotation externe de l'épaule, plus précisément lorsque l'épaule est en abduction horizontale (Figure 7.5). Il est nécessaire de rappeler que la capacité pour un joueur à conduire efficacement la raquette avant la phase

d'accélération dépend de la coordination de plusieurs mouvements segmentaires, parmi lesquels la rotation externe de l'épaule (Kovacs et Ellenbecker, 2011). Dans le but de créer une vitesse de raquette suffisante lorsque celle-ci descend dans le dos, les joueurs du groupe plateau semblent contrebalancer la restriction de la rotation externe de l'épaule par une augmentation de l'extension du poignet, ce qui peut finalement les amener à avoir une raquette positionnée en plateau.

L'utilisation d'une raquette trop lourde et / ou trop grande chez des jeunes joueurs en période de croissance et de développement musculaire pourrait avoir une influence sur la cinématique du membre supérieure au service. Whiteside et al. (2013) ont émis l'hypothèse que pour des jeunes joueuses qui démontrent un déficit de force musculaire au niveau du membre supérieur, l'augmentation du moment d'inertie de la raquette peut contribuer à augmenter de manière passive la rotation externe de l'épaule lors du service. Cette hypothèse paraît tout aussi valable en ce qui concerne l'augmentation de l'extension du poignet pour les jeunes joueurs. Toutefois, aucune différence significative n'est retrouvée pour les caractéristiques des raquettes entre le groupe plateau et le groupe normal, notamment en ce qui concerne le poids et l'équilibre (Tableau 7.1). En outre, tous les joueurs de notre étude ont utilisé une raquette de longueur standard (68,5 cm). Une mesure des niveaux de force du membre supérieur, et plus particulièrement des niveaux de force du poignet en flexion et en extension, nous aurait permis de réfuter totalement l'hypothèse d'un lien entre le service en plateau et l'utilisation d'une raquette inadaptée aux caractéristiques physiques des joueurs.

7.4.2.2 Prise de raquette

L'orientation de la raquette durant le service est naturellement liée à la prise de raquette du joueur (Smith, 2004). Dans notre étude, cette prise a été estimée comme l'angle relatif entre le plan de la raquette et le plan de la main. Bien qu'aucune différence significative n'existe entre les deux groupes concernant cet angle (Tableau 7.4), nos résultats montrent que les joueurs du groupe plateau utilisent une prise de raquette plus « fermée » (vers la prise fermée de coup droit) alors que les joueurs du groupe normal utilisent une prise plus « ouverte » (vers la prise continentale ou marteau) (Figure 7.6). Une prise « fermée de coup droit » aurait tendance à orienter la raquette vers le ciel au moment du MDP et pourrait donc contribuer à une impression visuelle d'organisation en plateau.

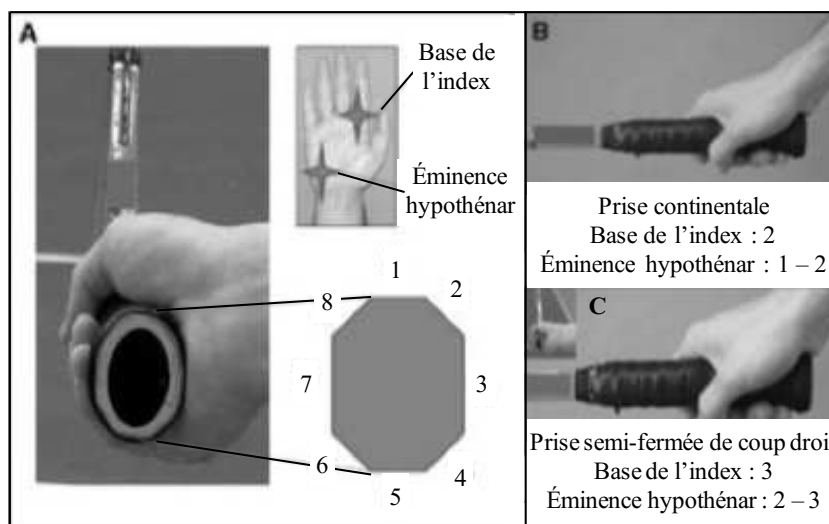


Figure 7.6 – Représentation des huit faces du manche de la raquette, des repères anatomiques de la main (A) et des prises « continentale » et « semi-fermée de coup droit » (B et C, la position de la main est identique mais l’inclinaison de la raquette est différente), d’après Tagliafico et al. 2009.

7.4.3 Limites

Nous avons choisi de coupler une analyse du mouvement du service avec un enregistrement prospectif des blessures afin d’établir un lien entre une organisation technique et le risque de blessures (Krosshaug et al., 2005). Nos résultats montrent des contraintes articulaires plus importantes sur le membre supérieur pour les joueurs du groupe plateau, et il est fortement admis dans la littérature qu’une augmentation des contraintes articulaires du membre supérieur dominant représente un facteur de risque de blessures chroniques (Abrams et al., 2014; Elliott et al., 2003; Martin et al., 2014; Reid, Elliott et Alderson, 2007). Néanmoins, les résultats concernant les blessures subies par les joueurs de notre étude doivent être pris avec précaution. Premièrement, sur les 18 joueurs intégrés dans cette étude, 9 participants ont été touchés par une blessure à l’épaule, 6 participants ont été touchés par une blessure au coude et 2 participants ont subi une blessure au poignet (Tableau 7.3). La taille de notre échantillon ne nous permet pas d’avoir des résultats statistiquement significatifs. Deuxièmement, les blessures sont considérées dans la littérature comme d’origine multifactorielle (Abrams et al., 2012; Pluim et Staal, 2010). Par conséquent, les blessures subies par les joueurs de notre échantillon ne peuvent pas être le simple fait de contraintes excessives au niveau du membre supérieur mais sont vraisemblablement causées par l’interaction entre plusieurs facteurs de risque tels que le volume de jeu, les déséquilibres musculaires ou encore la croissance (Abrams et al., 2012; DiFiori et al., 2014; Pluim et Staal, 2010). Enfin, nous avons restreint l’enregistrement des blessures sur une période d’un an après l’analyse biomécanique du service, et il est important de garder à l’esprit que les mécanismes responsables des blessures chroniques peuvent être initiés bien avant l’apparition de la blessure chronique (Andrews et Fleisig, 1998; Bahr et Holme, 2003). Nous pensons qu’étendre la période d’enregistrement des blessures pourrait permettre de saisir plus précisément les effets du service en plateau sur les blessures.

7.4.4 Recommandations pratiques aux entraîneurs et aux joueurs

Nous avons montré dans l'étude 1 de ce travail que le service en plateau est une organisation technique plus fréquente chez les joueurs élites U14 que chez les joueurs plus âgés. Les résultats de cette étude révèlent que cette organisation doit être considérée comme une erreur technique qu'il faut corriger pour limiter le risque de blessures chroniques du membre supérieur. Sur le terrain, l'apparition d'un plateau au cours de la phase d'armé s'observe très facilement grâce à l'analyse vidéo. Pour corriger cette posture, nous encourageons les entraîneurs à être vigilants sur l'amplitude d'abduction de l'épaule au début de la phase d'armé. En effet, un coude « trop bas » lorsque la raquette est en position haute semble limiter la rotation externe de l'épaule et contraindre les joueurs à augmenter l'extension du poignet pour accélérer la raquette vers le bas, ce qui favorise l'apparition d'une raquette en plateau. De notre point de vue, l'utilisation d'un service avec une préparation compacte (Figure 7.7) est une solution intéressante pour corriger ce problème puisque cette technique de service permet au joueur de positionner correctement le coude avant le lancer de balle. Surtout, la préparation compacte simplifie le mouvement du service et le début de l'accélération de la raquette, ce qui pourrait favoriser la stabilisation du coude tout au long de la phase d'armé du service. Même si nos résultats ne montrent pas de lien entre le service en plateau et les caractéristiques de la raquette, il nous semble également qu'utiliser une raquette plus légère et / ou plus courte lors des situations d'apprentissage permettrait au jeune joueur de contrôler plus facilement l'extension du poignet lors de la descente de la raquette, favorisant ainsi l'acquisition d'une technique de service correcte sur le plan biomécanique.



Figure 7.7 – Situation d'apprentissage utilisant le service avec une préparation compacte pour faciliter le positionnement du coude au début de la phase d'armé et le maintien de celui-ci lors de la descente de la raquette dans le dos.

Enfin, le problème du plateau tel que nous le décrivons ne doit pas être confondu avec un autre problème récurrent du jeune joueur, à savoir le changement de prise au service. Durant les premières années d'apprentissage, les jeunes joueurs utilisent quasi systématiquement une prise fermée ou semi-fermée de coup droit pour réaliser un service (Smith, 2004). Ce type de prise, qui permet de simplifier les actions segmentaires et le contact balle-raquette à l'impact, induit inévitablement l'apparition d'un plateau lors de la phase d'armé. Pour les jeunes joueurs élites, l'optimisation du service nécessite ensuite une modification de la prise de raquette vers une prise de type marteau (Knudson, 2008). Cette modification technique complexifie le mouvement du service, notamment parce qu'elle implique une action beaucoup plus prononcée

de pronation de l'avant-bras avant l'impact. La maîtrise du service avec une prise marteau peut alors se révéler difficile pour le jeune joueur et compromettre sa réussite à court ou moyen terme. Sur le terrain, il est coutume de penser que certains jeunes joueurs modifient plus ou moins consciemment leur prise de raquette au début du service ou au cours du mouvement pour se rapprocher d'une prise de raquette qu'il maîtrise mieux. Lors d'un entraînement, il est très facile pour un entraîneur de vérifier la prise de raquette au début du service. Cette observation devient en revanche beaucoup plus complexe au cours du mouvement, et de façon plus générale lors d'une situation de match. Le plateau constitue alors un élément simple à observer qui peut alerter l'entraîneur sur une modification de prise de raquette au cours du service.

7.5 Conclusion

Cette étude a identifié l'organisation en plateau comme un facteur « pathomécanique » lors du service des jeunes joueurs de tennis élites. En effet, cette organisation implique une augmentation des contraintes articulaires du membre supérieur, sans effet sur la vitesse de balle au service. Bien qu'aucune différence significative n'ait pu être enregistrée entre les deux groupes concernant les blessures à l'épaule, au coude ou au poignet, l'augmentation des contraintes articulaires retrouvée pour les joueurs du groupe plateau semble indiquer que cette organisation augmente le risque de blessures chroniques du membre supérieur. Dans le but de corriger cette posture et de minimiser les contraintes articulaires du membre supérieur, il est conseillé aux entraîneurs de tennis de porter leur attention sur l'abduction de l'épaule et sur l'extension du poignet lors de la phase d'armé du service. La prise de raquette ne doit pas être négligée dans l'interprétation de cette organisation technique chez le jeune joueur.

Chapitre 8

Conclusion générale

Ce travail de thèse a porté sur l'analyse biomécanique du service des jeunes joueurs et des jeunes joueuses élites français. Nos études, centrées sur le 1^{er} service, contribuent à apporter des réponses sur les trois points suivants : l'évolution technique du service des joueurs et des joueuses élites depuis l'âge de 12 ans jusqu'à l'âge adulte, les différences entre le service masculin et le service féminin, et les facteurs techniques en lien avec la performance et le risque de blessures du tronc et du membre supérieur dominant.

D'une manière générale, les études de la littérature se sont essentiellement focalisées sur le service des joueurs adultes, et presque exclusivement sur celui des hommes. Au niveau scientifique, ce travail apporte d'abord des données supplémentaires concernant la cinématique du service des jeunes filles et son évolution au cours de l'adolescence. À notre connaissance, ce travail est surtout le premier à s'être intéressé à cette problématique chez les jeunes garçons, permettant, par la même occasion, l'exploration des différences entre le service masculin et le service féminin. En outre, les niveaux de contraintes subies par les articulations du membre supérieur lors du service n'avaient jamais été mesurées pour des jeunes joueurs, et nos résultats fournissent un cadre qui pourra être réinvesti dans de futures études. Enfin, nous avons apporté des réponses sur le mauvais relais d'appuis et le service en plateau, deux éléments techniques qui attirent bien souvent l'œil des entraîneurs mais qui n'avaient jamais fait l'objet d'investigation.

L'étude 1 de ce travail a montré de grandes similitudes cinématiques entre le service des joueurs et des joueuses de 12 – 13 ans et celui des joueurs et des joueuses plus âgés. Chez les garçons, la descente de la raquette dans le dos s'opère avec un tamis plus ouvert pour les plus jeunes joueurs, c'est-à-dire en plateau, ce qui justifie l'étude 3 de cette thèse. De plus, l'explosivité de la poussée des jambes s'améliore jusqu'à 14 – 15 ans et l'action du tronc se modifie progressivement jusqu'à 16 ans. Ces deux éléments pourraient avoir un lien avec le type d'appuis utilisés au service, et l'étude 2 doit permettre, parmi d'autres objectifs, de vérifier cette hypothèse. Chez les filles, la principale différence cinématique concerne l'angle de séparation qui diminue avec l'âge. La vitesse du 1^{er} service augmente plus fortement chez les garçons que chez les filles au cours de l'adolescence, et la taille joue un rôle important sur cette vitesse. Au niveau de l'analyse dynamique, les contraintes articulaires maximales du membre supérieur augmentent progressivement chez les garçons entre 12 et 16 ans, alors que celles-ci ne sont pas dépendantes de l'âge chez les filles. Enfin, le service masculin et le service féminin sont aussi très semblables d'un point de vue cinématique lorsqu'ils sont comparés par catégorie d'âge. Toutefois, les garçons produisent une vitesse de balle systématiquement supérieure à celle des filles, et l'écart de vitesse se creuse avec l'avancée en âge. Ceci s'explique, outre la taille, par l'apparition successive de vitesses segmentaires du membre supérieur plus élevées chez les garçons : la vitesse de rotation interne de l'épaule à 12 – 13 ans, puis la vitesse de flexion du poignet à 14 – 15 ans, et enfin la vitesse d'extension du coude à partir de 16 ans.

Cette étude répond au besoin de construire une base de données quantitative et qualitative afin de pouvoir fournir des recommandations pertinentes aux joueurs et à leurs entraîneurs. Plus précisément, nos résultats permettent d'identifier les critères techniques du

service perfectibles entre 12 et 16 ans. À contrario, nos résultats mettent en évidence de nombreux invariants techniques entre le service des joueurs de 12 – 13 ans et celui des joueurs de plus de 16 ans, autrement dit les éléments techniques qui doivent être travaillés et maîtrisés de façon précoce chez les meilleurs espoirs. Notre analyse des contraintes articulaires générées sur le membre supérieur lors du service démontre la nécessité de proposer un renforcement musculaire ciblé dès l'âge de 12 ans chez les filles. Chez les garçons, ces contraintes augmentent plus progressivement avec l'âge. Toutefois, le nombre important de blessures à l'épaule observé pour les joueurs de 12 – 15 ans, et plus particulièrement ceux de 14 – 15 ans, suggère une période de fragilité qui encourage à commencer un renforcement musculaire préventif dès l'âge de 12 ans. Notre travail fournit également une base de données facilement exploitable concernant la vitesse du service des joueurs élites en fonction de l'âge, du sexe, de la taille ou encore du niveau de jeu. D'ailleurs, nous encourageons l'utilisation plus systématique de la vitesse de balle dans le cadre de l'évaluation et de l'entraînement du jeune joueur mais aussi dans le cadre de la détection des meilleurs espoirs. Enfin, l'analyse de nos résultats nous conduit à une réflexion plus globale sur le service et son enseignement chez les jeunes joueurs. Le constat à 12 – 13 ans est simple : le service est techniquement maîtrisé, mais il ne représente pas encore un coup fort pour dominer l'adversaire. Si le développement physique, et en particulier la taille, sont inévitablement à prendre en compte dans cette réflexion, nous pensons que les qualités techniques des jeunes joueurs ne sont pas assez vite mises à profit pour développer des intentions tactiques fortes au service. Nous encourageons l'utilisation de situations d'entraînement favorisant le développement de ces qualités, par exemple en avançant la position de départ du joueur. Dans ce cadre, une perspective de ce travail consistera à s'intéresser à l'évolution technique du service chez les meilleurs 8 – 11 ans et à l'influence des positions de départ sur la biomécanique du geste.

L'étude 2 a permis de montrer que l'utilisation du relais d'appuis au service conduit à une amélioration de l'explosivité des jambes chez les jeunes joueurs et les jeunes joueuses, confirmant ainsi une conviction partagée par de nombreux entraîneurs de tennis. Dans la mesure où l'utilisation du relais d'appuis est peu à peu privilégiée au cours de la formation, ces résultats fournissent aussi un élément d'explication quant à l'amélioration de l'explosivité de la poussée des jambes observée chez les garçons entre 12 et 15 ans (étude 1). Toutefois, nous ne retrouvons pas cette évolution chez les filles (étude 1). Par ailleurs, le relais d'appuis n'a aucune influence sur la vitesse de rotation antéropostérieure du tronc, ce qui était également envisagé pour expliquer l'augmentation de cette vitesse avec l'âge chez les garçons (étude 1), et plus globalement, il ne permet pas d'optimiser la performance par rapport à un service effectué sans relais d'appuis. En outre, le relais d'appuis n'est pas toujours bien exécuté, surtout de la part des jeunes joueuses, ce qui pourrait conduire à une gestuelle plus traumatisante pour les structures du tronc et de l'épaule.

Dans l'étude 3, nous avons démontré que le service en plateau ne modifie pas la vitesse de balle mais conduit à une augmentation des contraintes articulaires du membre supérieur. Pour expliquer l'apparition de ce facteur pathomécanique, nos résultats mettent en cause une extension plus forte du poignet et une abduction plus faible de l'épaule au moment de la phase d'armé du service.

L'étude de ces éléments techniques constitue un exemple concret qui reflète l'essence même de l'intégralité de ce travail, à savoir placer les problématiques sportives et les applications pratiques au centre de notre réflexion scientifique. Ainsi, nos résultats permettent d'identifier le service en plateau comme une erreur technique qui doit être corrigée pour prévenir les risques de blessures chroniques du membre supérieur. Nos résultats invitent également à la réflexion concernant le type d'appuis à enseigner au cours de l'apprentissage du

service. Si actuellement, les orientations techniques se tournent largement vers une utilisation du service avec relais d'appuis, nous montrons que le service sans relais d'appuis représente une organisation technique tout aussi efficace et probablement moins traumatisante pour le joueur. De plus, lorsque le joueur utilise un relais d'appuis, nous recommandons aux entraîneurs d'être extrêmement vigilants quant au positionnement du pied arrière par rapport au pied avant, ceci afin d'éviter une éventuelle sur-sollicitation des structures anatomiques du tronc et du membre supérieur.

Afin d'envisager la suite de ce travail, il convient d'en évoquer les limites en portant un regard critique sur notre méthodologie et sur nos résultats. Tout d'abord, nous avons utilisé la vitesse de balle pour définir la performance au service des jeunes joueurs et des jeunes joueuses, ce qui s'accorde parfaitement avec la littérature scientifique sur la biomécanique du service. Toutefois, ce choix ne nous fait pas occulter la dimension multifactorielle de la performance au service, notamment en ce qui concerne les qualités inhérentes à la performance du joueur en situation de match (intentions tactiques, gestion du stress). De plus, nous sommes conscients que l'efficacité du service reflète en partie l'expression des qualités individuelles du joueur. L'objectif de cette thèse n'était pas de résumer le service à un modèle technique « unique », mais d'identifier les critères biomécaniques qui jouent objectivement un rôle sur la vitesse du service. Dans le but de fournir des recommandations encore plus complètes aux entraîneurs, une perspective de ce travail consistera à coupler une analyse biomécanique du service avec une évaluation des préférences motrices individuelles (œil directeur, profils moteurs). Par ailleurs, nous avons utilisé l'âge chronologique pour définir ou apparier les groupes de nos études. Ce choix s'accorde avec la réalité de la compétition au tennis puisque les tournois et les championnats, aussi bien sur le plan national que sur le plan international, sont organisés par catégorie d'âge. Il en résulte que les politiques de détection, de sélection et plus globalement de formation des jeunes joueurs sont très largement guidées par des considérations liées à l'âge. Dans notre travail, l'utilisation de l'âge chronologique soulève néanmoins certaines interrogations au regard des disparités interindividuelles dans le développement physique au cours de la puberté. Pour objectiver ces disparités et discriminer plus efficacement la performance des jeunes joueurs, l'âge biologique devra être évalué lors de futures investigations. Par ailleurs, la blessure a été définie dans nos études comme une atteinte physique indépendamment de la nécessité d'une attention médicale ou de l'arrêt de la pratique du tennis. Aussi, dans les études 1 et 2, nous avons enregistré les blessures rapportées rétrospectivement par les joueurs grâce à un questionnaire écrit. Cette méthode d'enregistrement a pu entraîner des imprécisions voire des oublis de la part des jeunes joueurs, en particulier pour les blessures plus légères ou celles qui n'ont pas nécessité de consultation médicale, et finalement conduire à une sous-estimation du nombre total de blessures. La période de recueil a néanmoins été restreinte à l'année précédant la capture de mouvement pour minimiser ce biais méthodologique. Les jeunes joueurs impliqués dans l'étude 3 ont en revanche fait l'objet d'un suivi longitudinal avec un diagnostic de blessures établi par un seul et même médecin, ce qui nous a permis d'obtenir des données fiables et précises sur le nombre, la localisation et la sévérité des blessures.

.....

Les sportifs de haut niveau subissent des contraintes fortes en termes de charge d'entraînement et de planning. Ces contraintes, d'autant plus vraies au tennis, ne facilitent pas la mise en place d'un suivi régulier du joueur : des structures d'entraînement éclatées sur tout

le territoire, des projets sportifs hautement individualisés, mais aussi et surtout des tournois, souvent à l'étranger, qui impliquent une modification régulière de la programmation des joueurs en fonction des résultats. Afin de mener des analyses pertinentes du sport à très haut niveau, il est pourtant essentiel de réaliser un suivi régulier des joueurs et de collecter des informations continues tant sur le plan de la performance que sur celui des données médicales. Dans ce travail de thèse, nous avons couplé une analyse biomécanique du mouvement avec un recueil épidémiologique des blessures. À notre connaissance, aucune étude n'a collecté ce type de données sur une population aussi large de joueurs élites, avec plus d'une vingtaine de joueurs ayant obtenu un ou plusieurs titres de champion de France. De plus, pour acquérir l'adhésion des sportifs, des entraîneurs et de la FFT à ce type de travail de recherche, il est primordial de faire des retours rapides vers les joueurs. En effet, même si les jeunes joueurs de haut niveau restent des sportifs en formation, ils ont besoin de résultats immédiats pour orienter leur entraînement et optimiser leur performance. Nous avons ainsi effectué la rédaction de près d'une centaine de comptes rendus, avec ce souci du délai mais aussi celui du détail, afin de permettre aux entraîneurs une adaptation rapide des séances d'entraînement. Ce couplage fort entre sciences et sport a en effet été au cœur de nos préoccupations, et ce travail de thèse a été réalisé dans cet esprit pour un impact réel sur le terrain. Ce dernier n'aurait donc pas pu être réalisé sans cette coopération étroite entre joueurs, entraîneurs, médecins et FFT d'un côté et les scientifiques de l'autre. La poursuite de ce travail commun permettra sans nul doute de répondre aux perspectives ouvertes par cette thèse.

Chapitre 9

Valorisations scientifiques

9.1 Publications

Articles internationaux dans des revues indexées

- Touzard, P., Kulpa, R., Bideau, B., Montalvan, B. et Martin, C. (2019). Biomechanical analysis of the “waiter’s serve” on upper limb loads in young elite tennis players. *European Journal of Sport Science*, 19(6), 765–773.

Articles internationaux dans des revues indexées (co-auteur)

- Martin, C., Bideau, B., Touzard, P. et Kulpa, R. (2019). Identification of serve pacing strategies during five-set tennis matches. *International Journal of Sport Science and Coaching*, 14(1), 32–42.
- Martin, C., Sorel, A., Touzard, P., Gaborit, R., DeGroot, H. et Kulpa, R. (sous presse). *Is the open stance forehand really more dangerous for hip injury risks in tennis players?* The Orthopaedic Journal of Sports Medicine.

9.2 Communications

Congrès internationaux

- Touzard, P., Kulpa, R., Bideau, B., Montalvan, B. et Martin, C. (2017). Biomechanical analysis of tennis serve in young elite players: effect of the “waiter’s serve” on upper limb loads [communication orale]. 22nd Annual Congress of the European College of Sport Science, Essen, Germany.

Congrès internationaux (annulation pour raisons sanitaires)

- Touzard, P., Kulpa, R., Bideau, B. et Martin, C. (2020). Biomechanical analysis of tennis serve in young elite players: influence of lower limbs coordination in performance and injury risks [communication orale acceptée]. 2020 World Congress of Society for Tennis Medicine and Science, Tokyo, Japan.

Congrès nationaux (annulation pour raisons sanitaires)

- Touzard, P., Kulpa, R., Bideau, B. et Martin, C. (2020). Influence de l’âge sur les paramètres cinématiques du service au tennis chez des jeunes joueurs et joueuses élites [communication orale acceptée]. 2^{ème} colloque Internationale. Le Tennis dans la société de demain, Dijon, France.

Bibliographie

Abrams, G., Harris, A., Andriacchi, T. et Safran, M. (2014). Biomechanical analysis of three tennis serve types using a markerless system. *British Journal of Sports Medicine*, 48(4), 339–342.

Abrams, G., Renstrom, P. et Safran, M. (2012). Epidemiology of musculoskeletal injury in the tennis player. *British Journal of Sports Medicine*, 46(7), 492–498.

Abrams, G., Sheets, A., Andriacchi, T. et Safran, M. (2011). Review of tennis serve motion analysis and the biomechanics of three serve types with implications for injury. *Sports Biomechanics*, 10(4), 378–390.

Alyas, F., Turner, M. et Connell, D. (2007). MRI findings in the lumbar spines of asymptomatic adolescent elite tennis players. *British Journal of Sports Medicine*, 41(11), 836–841.

Andrews, J. et Fleisig, G. (1998). Preventing throwing injuries. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 27(3), 187–188.

Antoun, R. (2007). *Women's Tennis Tactics: Winning today's game*. Human Kinetics.

Anz, A., Bushnell, B., Griffin, L., Noonan, T., Torry, M. et Hawkins, R. (2010). Correlation of torque and elbow injury in professional baseball pitchers. *American Journal of Sports Medicine*, 38(7), 1368–1374.

Archambault, J., Wiley, J. et Bray, R. (1995). Exercise loading of tendons and the development of overuse injuries. A review of current literature. *Sports Medicine*, 20(2), 77–89.

Azuma, Y., Morihara, T., Matsui, T., Seo, K., Hiramoto, M., Miyazaki, T., Takemoto, H., Okuno, T., Miki, S., Ashiwake, S., Deguchi, M., Kida, N. et Morifusa, S. (2016). *Correlation Between Throwing Motion and Maximum Elbow Varus Torque in Female Professional Baseball Pitchers* [communication]. 34th International Conference on Biomechanics in Sports, Tsukuba, Japan.

Bahamonde, R. (2000). Changes in angular momentum during the tennis serve. *Journal of Sports Sciences*, 18(8), 579–592.

Bahamonde, R. et Knudson, D. (2001). Ground reaction forces and two types of stances and tennis serves. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(5), S102.

Bahr, R. (2009). No injuries, but plenty of pain? On the methodology for recording overuse symptoms in sports. *British Journal of Sports Medicine*, 43(13), 966–972.

Bahr, R. et Holme, I. (2003). Risk factors for sports injuries—a methodological approach. *British Journal of Sports Medicine*, 37(5), 384–392.

Bahr, R. et Krosshaug, T. (2005). Understanding injury mechanisms: a key component of preventing injuries in sport. *British Journal of Sports Medicine*, 39(6), 324–329.

- Baiget, E., Corbi, F., Fuentes, J. P. et Fernández-Fernández, J. (2016). The Relationship Between Maximum Isometric Strength and Ball Velocity in the Tennis Serve. *Journal of Human Kinetics*, 53, 63–71.
- Balius, R., Pedret, C., Galilea, P., Idoate, F. et Ruiz-Cotorro, A. (2012). Ultrasound assessment of asymmetric hypertrophy of the rectus abdominis muscle and prevalence of associated injury in professional tennis players. *Skeletal radiology*, 41(12), 1575–1581.
- Barber-Westin, S., Noyes, F. et Galloway, M. (2006). Jump-land characteristics and muscle strength development in young athletes: a gender comparison of 1140 athletes 9 to 17 years of age. *American Journal of Sports Medicine*, 34(3), 375–384.
- Barile, A., Limbucci, N., Splendiani, A., Gallucci, M. et Masciocchi, C. (2007). Spinal injury in sport. *European journal of Radiology*, 62(1), 68–78.
- Barnett, T., Meyer, D. et Pollard, G. (2008). Applying match statistics to increase serving performance. *Journal of Medicine and Science in Tennis*, 13(2), 24–27.
- Bartlett, R. (2007). *Introduction to Sports Biomechanics: Analysing Human Movement Patterns* (2^e éd.). Routledge.
- Bartlett, R. et Bussey, M. (2009). *Sports Biomechanics: Reducing Injury Risk and Improving Sports Performance*. Routledge.
- Baxter-Jones, A., Eisenmann, J. et Sherar, L. (2005). Controlling for maturation in pediatric exercise science. *Pediatric Exercise Science*, 17(1), 18–30.
- Baxter-Jones, A., Maffulli, N. et Helms, P. (1993). Low injury rates in elite athletes. *Archives of Disease in Childhood*, 68(1), 130–132.
- Blackwell, J. et Knudson, D. (2002). Effect of type 3 (oversize) tennis ball on serve performance and upper extremity muscle activity. *Sports Biomechanics*, 1(2), 187–192.
- Bonato, M., Maggioni, M., Rossi, C., Rampichini, S., La Torre, A. et Merati, G. (2015). Relationship between anthropometric or functional characteristics and maximal serve velocity in professional tennis players. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 55(10), 1157–1165.
- Bonnefoy, A., Slawinski, J., Leveque, J., Riquet, A. et Miller, C. (2009). Relationship between the vertical racquet head height and the lower limb motions of elite players' flat serve. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 12(S1), 55–57.
- Braun, S., Kokmeyer, D. et Millett, P. (2009). Shoulder injuries in the throwing athlete. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 91(4), 966–978.
- Brechbuhl, J., Tièche, L. et Frey, D. (2001). Some observations on the service action. *ITF Coaching and Sport Science Review*, 25, 4–5.
- Brody, H. (1985). The moment of inertia of a tennis racket. *The Physics Teacher*, 23(4), 213–216.
- Brody, H. (2003). Serving Strategy. *ITF Coaching and Sport Science Review*, 31, 2–3.

- Brown, E. et O'Donoghue, P. (2008). Gender and surface effect on elite tennis strategy. *ITF Coaching and Sport Science Review*, 46, 9–11.
- Bylak, J. et Hutchinson, M. (1998). Common sports injuries in young tennis players. *Sports Medicine*, 26(2), 119–132.
- Cahill, D. (2002). Tactics of the baseline player. *ITF Coaching and Sport Science Review*, 27, 3–4.
- Cahouët, V., Luc, M. et David, A. (2002). Static optimal estimation of joint accelerations for inverse dynamics problem solution. *Journal of Biomechanics*, 35(11), 1507–1513.
- Cain, E.J., Dugas, J., Wolf, R. et Andrews, J. (2003). Elbow injuries in throwing athletes: a current concepts review. *American Journal of Sports Medicine*, 31(4), 621–635.
- Campbell, A., O'Sullivan, P., Straker, L., Elliott, B. et Reid, M. (2014). Back pain in tennis players: a link with lumbar serve kinematics and range of motion. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 46(2), 351–357.
- Campbell, A., Straker, L., O'Sullivan, P., Elliott, B. et Reid, M. (2013). Lumbar Loading in the Elite Adolescent Tennis Serve: A Link to Low Back Pain. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 45(8), 1562–1568.
- Carboch, J. (2017). Comparison of game characteristics of male and female tennis players at grand-slam tournaments in 2016. *Trends in Sport Sciences*, 4(24), 151–155.
- Carboch, J. et Süß, V. (2015). Toss differences between the slice and the kick serve in tennis. *Acta Gymnica*, 45(2), 93–97.
- Chan, K., Fong, D., Hong, Y., Yung, P. et Lui, P. (2008). Orthopaedic sport biomechanics - a new paradigm. *Clinical Biomechanics*, 23(1), S21–30.
- Chombart, J. P. et Thomas, R. (1990). *Le tennis*. Presses universitaires de France.
- Chow, J., Carlton, L., Lim, Y., Chae, W., Shim, J., Kuenster, A. et Kokubun, K. (2003). Comparing the pre- and post-impact ball and racquet kinematics of elite tennis players' first and second serves: a preliminary study. *Journal of Sports Sciences*, 21(7), 529–537.
- Chow, J., Park, S. et Tillman, M. (2009). Lower trunk kinematics and muscle activity during different types of tennis serves. *Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation, Therapy and Technology*, 1(1), 24. <https://doi.org/10.1186/1758-2555-1-24>
- Chu, Y., Fleisig, G., Simpson, K. et Andrews, J. (2009). Biomechanical comparison between elite female and male baseball pitchers. *Journal of Applied Biomechanics*, 25(1), 22–31.
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for Behavioral Sciences* (2^e éd.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Colberg, R., Aune, K., Choi, A. et Fleisig, G. (2015). Incidence and prevalence of musculoskeletal conditions in collegiate tennis athletes. *Journal of Medicine and Science in Tennis*, 20(3), 137–144.

Cools, A., Declercq, G., Cagnie, B., Cambier, B. et Witvrouw, E. (2008). Internal impingement in the tennis player: rehabilitation guidelines. *British Journal of Sports Medicine*, 42(3), 165–171.

Cross, R. et Pollard, G. (2009). Grand Slam men's singles tennis 1991-2009. Serve speeds and other related data. *ITF Coaching and Sport Science Review*, 16, 8–10.

Davis, J., Limpisvasti, O., Fluhme, D., Mohr, K., Yocum, L., Elattrache, N. et Jobe, F. (2009). The effect of pitching biomechanics on the upper extremity in youth and adolescent baseball pitchers. *American Journal of Sports Medicine*, 37(8), 1484–1491.

De Leva, P. (1996). Joint center longitudinal positions computed from a selected subset of Chandler's data. *Journal of Biomechanics*, 29(9), 1231–1233.

De Luca, C.J. (1997). The Use of Surface Electromyography in Biomechanics. *Journal of Applied Biomechanics*, 13, 135–163.

Desjardins, P., Plamondon, A. et Gagnon, M. (1998). Sensitivity analysis of segment models to estimate the net reaction moments at the l5/s1 joint in lifting. *Medical Engineering and Physics*, 20(2), 153–158.

Di Giacomo, G., de Gasperis, N. et Costantini, A. (2016). Tennis: Epidemiology and Injury Mechanism. Dans P. Volpi (dir.), *Arthroscopy and Sport Injuries: Applications in High-level Athletes* (p. 19–24). Springer.

DiFiori, J., Benjamin, H., Brenner, J., Gregory, A., Jayanthi, N., Landry, G. et Luke, A. (2014). Overuse injuries and burnout in youth sports: a position statement from the American Medical Society for Sports Medicine. *British Journal of Sports Medicine*, 48(4), 287–288.

Dillman, C., Schultheis, J., Hintermeister, R. et Hawkins, R. (1995). What do we know about body mechanics involved in tennis skills? Dans H. Krahl, H. Pieper, B. Kibler et P. Renstrom (dir.), *Tennis : Sports Medicine and Science* (p. 6–11). Society for Tennis Medicine and Science.

Dines, J., Bedi, A., Williams, P., Dodson, C., Ellenbecker, T., Altchek, D., Windler, G. et Dines, D. (2015). Tennis injuries: epidemiology, pathophysiology, and treatment. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 23(3), 181–189.

Dowling, B., Pearl, C., Laughlin, W., Tubbs, T. et Fleisig, G. (2016). *Relationship of pelvic and trunk kinematics to ball velocity in professional baseball pitchers* [communication]. 40th Annual Meeting of the American Society of Biomechanics, Raleigh, NC, USA.

Eckenrode, B. J., et Kelley, M. J. (2009). Clinical biomechanics of the shoulder complex. Dans K. E. Wilk, M. M. Reinold et J. R. Andrews (dir.), *The athlete's shoulder* (2^e éd., p. 17–41). Philadelphia, PA: Churchill Livingstone Elsevier.

Ellenbecker, T. (1991). A total arm strength isokinetic profile of highly skilled tennis players. *Isokinetics and Exercise Science Therapy*, 1(1), 9–21.

Ellenbecker, T. (2006). The Relationship Between Stroke Mechanics and Injuries in Tennis. *The USTA Newsletter for Tennis Coaches*, 8(2), 7.

- Ellenbecker, T. (2014). Musculoskeletal Examination of Elite Junior Tennis Player. *Aspetar Sports Medicine Journal*, 3, 548–556.
- Ellenbecker, T., Pluim, B., Vivier, S. et Sniteman, C. (2009). Common injuries in tennis players: exercises to address muscular imbalances and reduce injury risk. *Strength and Conditioning Journal*, 31(4), 50–58.
- Ellenbecker, T. et Roetert, E. (2003). Age specific isokinetic glenohumeral internal and external rotation strength in elite junior tennis players. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 6(1), 63–70.
- Ellenbecker, T., Roetert, E., Bailie, D., Davies, G. et Brown, S. (2002). Glenohumeral joint total rotation range of motion in elite tennis players and baseball pitchers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34(12), 2052–2056.
- Ellenbecker, T., Roetert, E., Sueyoshi, T. et Riewald, S. (2007). A descriptive profile of age-specific knee extension flexion strength in elite junior tennis players. *British Journal of Sports Medicine*, 41(11), 728–732.
- Elliott, B. (1999). Biomechanics: an integral part of sport science and sport medicine. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2(4), 299–310.
- Elliott, B. (2001). The serve. *ITF Coaching and Sport Science Review*, 24, 3–5.
- Elliott, B. (2006). Biomechanics and tennis. *British Journal of Sports Medicine*, 40(5), 392–396.
- Elliott, B., Fleisig, G., Nicholls, R. et Escamilla, R. (2003). Technique effects on upper limb loading in the tennis serve. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 6(1), 76–87.
- Elliott, B., Marshall, R. et Noffal, G. (1995). Contributions of upper limb segment rotations during the power serve in tennis. *Journal of Applied Biomechanics*, 11(4), 433–442.
- Elliott, B. et Reid, M. (2004). Analysing serve and groundstroke technique on court. *ITF Coaching and Sport Science Review*, 32, 2–4.
- Elliott, B., Takahashi, K. et Noffal, G. (1997). The influence of grip position on upper limb contributions to racket head velocity in a tennis forehand. *Journal of Applied Biomechanics*, 13(2), 182–196.
- Elliott, B., Whiteside, D., Lay, B. et Reid, M. (2013). *The female tennis serve: an analogous version of the male serve* [communication]? 31st Conference of the International Society of Biomechanics in Sport, Taipei, Taiwan.
- Elliott, B. et Wood, G. (1983). The biomechanics of foot-up and foot-back tennis service techniques. *Australian Journal of Sports Sciences*, 3(2), 3–6.
- Engelbrechtsen, L., Soligard, T., Steffen, K., Alonso, J., Aubry, M., Budgett, R., Dvorak, J., Jegathesan, M., Meeuwisse, W., Mountjoy, M., Palmer-Green, D., Vanhegan, I. et Renstrom, P. (2013). Sport injuries and illnesses during the London Summer Olympic Games 2012. *British Journal of Sports Medicine*, 47(7), 407–414.

- Escamilia, R. et Andrews, J. (2009). Shoulder muscle recruitment patterns and related biomechanics during upper extremity sports. *Sports Medicine*, 39(7), 569–590.
- Eyendaal, D., Rahussen, F.T. et Diercks, R.L. (2007). Biomechanics of the elbow joint in tennis players and relation to pathology. *British Journal of Sports Medicine*, 41(11), 820–823.
- Fernandez-Fernandez, J., Ellenbecker, T., Sanz-Rivas, D., Ulbricht, A. et Ferrauti, A. (2013). Effects of a 6-week junior tennis conditioning program on service velocity. *Journal of Sports Science and Medicine*, 12(2), 232–239.
- Fernandez-Fernandez, J., Ruiz-Cotorro, A., Estruch, A. et Mendez-Villanueva, A. (2009). Health benefits of tennis in adult population. *ITF Coaching and Sport Science Review*, 16, 13–16.
- Fernandez-Fernandez, J., Sanz-Rivas, D., Fernandez-Garcia, B. et Mendez-Villanueva, A. (2008). Match activity and physiological load during a clay-court tennis tournament in elite female players. *Journal of Sports Sciences*, 26(14), 1589–1595.
- Fernandez-Fernandez, J., Ulbricht, A. et Ferrauti, A. (2014). Fitness testing of tennis players: how valuable is it? *British Journal of Sports Medicine*, 48(S1), i22–i31.
- FFT. (2017). *Projet de performance fédéral 2017 / 2024. Partie 1 sur 2 : 2017 / 2020. Document non publié.*
- Filipic, A., Zecic, M., Reid, M., Crespo, M., Panjan, A. et Sarabon, N. (2015). Differences in performance indicators of elite tennis players in the period 1991–2010. *Journal of Physical Education and Sport*, 15(4), 671–677.
- Fleisig, G., Andrews, J., Dillman, C. et Escamilia, R. (1995). Kinetics of baseball pitching with implications about injury mechanisms. *American Journal of Sports Medicine*, 23(2), 233–239.
- Fleisig, G., Barrentine, S., Escamilla, R. et Andrews, J. (1996). Biomechanics of overhand throwing with implications for injuries. *Sports Medicine*, 21(6), 421–437.
- Fleisig, G., Barrentine, S., Zheng, N., Escamilia, R. et Andrews, J. (1999). Kinematic and kinetic comparison of baseball pitching among various levels of development. *Journal of Biomechanics*, 32(12), 1371–1375.
- Fleisig, G., Diffendaffer, A., Ivey, B., Aune, K., Laughlin, T., Fortenbaugh, D., Bolt, B., Lucas, W., Moore, K. et Dugas, J. (2018). Changes in youth baseball pitching biomechanics: a 7-year longitudinal study. *American Journal of Sports Medicine*, 46(1), 44–51.
- Fleisig, G. et Escamilia, R. (1996). Biomechanics of the elbow in the throwing athlete. *Operative Techniques in Sports Medicine*, 4(2), 62–68.
- Fleisig, G., Nicholls, R., Elliott, B. et Escamilia, R. (2003). Kinematics used by world class tennis players to produce high-velocity serves. *Sports Biomechanics*, 2(1), 51–64.
- Fortenbaugh, D., Fleisig, G. et Andrews, J. (2009). Baseball pitching biomechanics in relation to injury risk and performance. *Sports Health*, 1(4), 314–320.

- Fu, M., Ellenbecker, T., Renstrom, P., Windler, G. et Dines, D. (2018). Epidemiology of injuries in tennis players. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*, 11(1), 1–5.
- Genevois, C. (2014). Service : développer un jeu de jambes efficient chez les jeunes. *FFT : E-Mag Club Fédéral des Enseignants*, 90, 9–17. https://www.academia.edu/7845242/Service_et_jeu_de_jambes_en_tennis
- Gescheit, D., Cormack, S., Duffield, R., Kovalchik, S., Wood, T., Omizzolo, M. et Reid, M. (2018). A multi-year injury epidemiology analysis of an elite national junior tennis program [manuscrit accepté pour publication dans le *Journal of Science and Medicine in Sport*]. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2018.06.006>
- Gescheit, D., Cormack, S., Duffield, R., Kovalchik, S., Wood, T., Omizzolo, M. et Reid, M. (2017). Injury epidemiology of elite tennis players at the 2011–2016 Australian Open. *British Journal of Sports Medicine*, 51(17), 1289–1294.
- Gillet, B., Begon, M., Sevrez, V., Berger-Vachon, C. et Rogowski, I. (2017). Adaptive alterations in shoulder range of motion and strength in young tennis players. *Journal of Athletic Training*, 52(2), 137–144.
- Gillet, E., Leroy, D., Thouvarecq, R. et Stein, J. (2009). A notational analysis of elite tennis serve and serve-return strategies on slow surface. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(2), 532–539.
- Girard, O., Micallef, J. et Millet, G. (2007). Influence of restricted knee motion during the flat first serve in tennis. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(3), 950–957.
- Girard, O., Micallef, J. et Millet, G. (2005). Lower-limb activity during the power serve in tennis: effects of performance level. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37(6), 1021–1029.
- Girard, O. et Millet, G. (2009). Physical determinants of tennis performance in competitive teenage players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(6), 1867–1872.
- Gordon, B. et Dapena, J. (2006). Contributions of joint rotations to racquet speed in the tennis serve. *Journal of Sports Sciences*, 24(1), 31–49.
- Haake, S., Rose, P. et Kotze, J. (2000). Reaction time testing and grand slam tie-break data. Dans S. Haake et A. Coe (dir.), *Tennis science & technology* (p. 269–276). Oxford: Blackwell Science.
- Handelsman, D. (2017). Sex differences in athletic performance emerge coinciding with the onset of male puberty. *Clinical Endocrinology*, 87(1), 68–72.
- Hatze, H. (2000). The inverse dynamics problem of neuromuscular control. *Biological Cybernetics*, 82(2), 133–141.
- Hayes, M., Spits, D., Watts, D. et Kelly, V. (2018). The relationship between tennis serve velocity and select performance measures [manuscrit accepté dans le *Journal of Strength and Conditioning Research*]. EPrints. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002440>

Hermens, H., Freriks, B., Disselhorst-Klug, C. et Rau, G. (2000). Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 10(5), 361–374.

Hizan, H., Whipp, P. et Reid, M. (2011). Comparison of serve and serve return statistics of high performance male and female tennis players from different age-groups. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 11(2), 365–375.

Hizan, H., Whipp, P. et Reid, M. (2015). Gender differences in the spatial distributions of the tennis serve. *International Journal of Sports Science and Coaching*, 10(1), 87–96.

Hjelm, N., Werner, S. et Renstrom, P. (2012). Injury risk factors in junior tennis players: a prospective 2-year study. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 22(1), 40–48.

Hurd, W. et Kaufman, K. (2012). Glenohumeral rotational motion and strength and baseball pitching biomechanics. *Journal of Athletic Training*, 47(3), 247–256.

Hutchinson, M., Laprade, R., Burnett, Q., Moss, R. et Terpstra, J. (1995). Injury surveillance at the USTA Boys' Tennis Championships: a 6-yr study. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 27(6), 826–830.

Iino, Y. et Kojima, T. (2012). Validity of the top-down approach of inverse dynamics analysis in fast and large rotational trunk movements. *Journal of Applied Biomechanics*, 28(12), 420–430.

INJEP. (2018). *Tableaux statistiques relatifs au recensement des licences sportives en 2018*. <https://injep.fr/donnee/tableaux-statistiques-relatifs-au-recensement-des-licences-sportives-de-2018/>

INSERM. (2008). *Activité physique : contexte et effets sur la santé. Synthèse et recommandations. Rapport technique*. <http://www.ipubli.inserm.fr/handle/10608/80>

Inui, H., Hashimoto, T. et Nobuhara, K. (2009). External rotation during elevation of the arm. *Acta Orthopaedica*, 80(4), 451–455.

Jayanthi, N., LaBella, C., Fischer, D., Pasulka, J. et Dugas, L. (2015). Sports-specialized intensive training and the risk of injury in young athletes: a clinical case-control study. *American Journal of Sports Medicine*, 43(4), 794–801.

Jayanthi, N., O'Boyle, J. et Durazo-Arvizu, R. (2009). Risk factors for medical withdrawals in United States tennis association junior national tennis tournaments: a descriptive epidemiological study. *Sports Health*, 1(3), 231–235.

Jayanthi, N., Sallay, P., Hunker, P. et Przybylski, M. (2005). Skill-level related injuries in recreational competition tennis players. *Journal of Medicine and Science in Tennis*, 40(1), 12–15.

Johnson, C., McHugh, M., Wood, T. et Kibler, W. (2006). Performance demands of professional male tennis players. *British Journal of Sports Medicine*, 40(8), 696–699.

- Kaffel, C., Creveaux, T., Genevois, C., Rahme, M., Botta, A. et Rogowski, I. (2013). Épidémiologie des pathologies du membre supérieur dominant chez les joueurs de tennis français. *Journal de Traumatologie du Sport*, 30(3), 124–128.
- Kannus, P. (1997). Etiology and pathophysiology of chronic tendon disorders in sports. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 7(2), 78–85.
- Kendall, F., McCreary, E., Provance, P., Rodgers, M. et Romani, W. (2005). Upper extremity and shoulder girdle. Dans *Muscle Testing and Function with Posture and Pain* (5^e éd., p. 245–358). Baltimore: Lippincott Williams and Wilkins.
- Kibler, W., Chandler, J., Shapiro, R. et Conuel, M. (2007). Muscle activation in coupled scapulohumeral motions in the high performance tennis serve. *British Journal of Sports Medicine*, 41(11), 745–749.
- Kibler, W., Chandler, T., Livingston, B. et Roetert, E. (1996). Shoulder range of motion in elite tennis players. Effect of Age and years of tournament play. *American Journal of Sports Medicine*, 24(3), 279–285.
- Kibler, W., Kuhn, J., Wilk, K., Sciascia, A., Moore, S., Laudner, K., Ellenbecker, T., Thigpen, C. et Uhl, T. (2013). The disabled throwing shoulder: spectrum of pathology-10-year update. *The Journal of Arthroscopic and Related Surgery*, 29(1), 141–161.
- Kibler, W. et Safran, M. (2005). Tennis injuries. *Medicine and Sport Science*, 48, 120–137.
- Kibler, W. et Thomas, S. (2012). Pathomechanics of the throwing shoulder. *Sports Medicine and Arthroscopy Review*, 20(1), 22–29.
- Knudson, D. (2001). Improving stroke technique using biomechanical principles. *ITF Coaching and Sport Science Review*, 24, 11–13.
- Knudson, D. (2007). Qualitative biomechanical principles for application in coaching. *Sports Biomechanics*, 6(1), 109–118.
- Knudson, D. (2008). Key Differences in Beginner and Advanced Tennis Serves. *ITF Coaching and Sport Science Review*, 45, 21–22.
- Kovacs, M. (2006). Applied physiology of tennis performance. *British Journal of Sports Medicine*, 40(5), 381–386.
- Kovacs, M. et Ellenbecker, T. (2011). An 8-stage model for evaluating the tennis serve: implications for performance enhancement and injury prevention. *Sports Health*, 3(6), 504–513.
- Kovacs, M., Ellenbecker, T., Kibler, W., Roetert, E. et Lubbers, P. (2014). Injury trends in American competitive junior tennis players. *Journal of Medicine and Science in Tennis*, 19(1), 19–23.
- Kovalchik, S. et Reid, M. (2017). Comparing matchplay characteristics and physical demands of junior and professional tennis athletes in the era of big data. *Journal of Sports Science and Medicine*, 16(4), 489–497.

- Krosshaug, T., Andersen, T., Olsen, O., Myklebust, G. et Bahr, R. (2005). Research approaches to describe the mechanisms of injuries in sport: limitations and possibilities. *British Journal of Sports Medicine*, 39(6), 330–339.
- Läderrmann, A., Chagué, S., Kolo, F. et Charbonnier, C. (2016). Kinematics of the shoulder joint in tennis players. *Journal of Medicine and Science in Tennis*, 19(1), 56–63.
- Leardini, A., Cappozzo, A., Catani, F., Toksyig-Larsen, S., Petitto, A., Sforza, V., Cassanelli, G. et Giannini, S. (1999). Validation of a functional method for the estimation of hip joint centre location. *Journal of Biomechanics*, 32(1), 99–103.
- Lin, F., Kohli, N., Perlmutter, S., Dohyung, L., Nuber, G. et Makhsous, M. (2007). Muscle contribution to elbow joint valgus stability. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, 16(6), 795–802.
- Lintner, D., Noonan, T. et Kibler, W. (2008). Injury patterns and biomechanics of the athlete's shoulder. *Clinics in Sports Medicine*, 27(4), 527–551.
- Lloyd, R. S., Oliver, J. L., Faigenbaum, A. D., Myer, G. D. et De Ste Croix, M. B. (2014). Chronological age vs. biological maturation: implications for exercise programming in youth. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(5), 1454–1464.
- Lombardo, M. et Deaner, R. (2018). On the evolution of the sex differences in throwing: throwing is a male adaptation in humans. *The Quarterly Review of Biology*, 93(2), 91–119.
- Luera, M., Dowling, B., Magrini, M., Muddle, T., Colquhoun, R. et Jenkins, N. (2018). Role of rotational kinematics in minimizing elbow varus torques for professional versus high school pitchers. *The Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 6(3). <https://doi.org/10.1177/2325967118760780>
- Lyman, S., Fleisig, G., Andrews, J. et Osinski, E. (2002). Effect of pitch type, pitch count, and pitching mechanics on risk of elbow and shoulder pain in youth baseball pitchers. *American Journal of Sports Medicine*, 30(4), 463–468.
- Lynall, R., Kerr, Z., Djoko, A., Pluim, B., Hainline, B. et Dompier, T. (2016). Epidemiology of National Collegiate Athletic Association men's and women's tennis injuries, 2009/2010-2014/2015. *British Journal of Sports Medicine*, 50(19), 1211–1216.
- Ma, S., Liu, C., Tan, Y. et Ma, S.C. (2013). Winning matches in Grand Slam men's singles: an analysis of player performance-related variables from 1991 to 2008. *Journal of Sports Sciences*, 31(11), 1147–1155.
- Malina, R. M., Eisenmann, J. C., Cumming, S. P., Ribeiro, B. et Aroso, J. (2004). Maturity-associated variation in the growth and functional capacities of youth football (soccer) players 13-15 years. *European Journal of Applied Physiology*, 91(5-6), 555–562.
- Manske, R. et Ellenbecker, T. (2013). Current concepts in shoulder examination of the overhead athlete. *The International Journal of Sports Physical Therapy*, 8(5), 554–578.
- Maquirriain, J. et Baglione, R. (2016). Epidemiology of tennis injuries: an eight-year review of Davis Cup retirements. *European Journal of Sport Science*, 16(2), 266–270.

- Maquirriain, J. et Ghisi, J. (2006). The incidence and distribution of stress fractures in elite tennis players. *British Journal of Sports Medicine*, 40(5), 454–459.
- Maquirriain, J., Ghisi, J. et Kokalj, A. (2007). Rectus abdominis muscle strains in tennis players. *British Journal of Sports Medicine*, 41(11), 842–848.
- Marshall, R. et Elliott, B. (2000). Long-axis rotation: the missing link in proximal-to-distal segmental sequencing. *Journal of Sports Sciences*, 18(4), 247–254.
- Martin, C. (2013). *Analyse biomécanique du service au tennis : liens avec la performance et les pathologies du membre supérieur* [thèse de doctorat, Université Rennes 2, France]. TEL. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00919831>
- Martin, C. (2015). Should players serve using the foot-up or foot-back technique? *ITF Coaching and Sport Science Review*, 67, 17–19.
- Martin, C., Bideau, B., Nicolas, G., Delamarche, P. et Kulpa, R. (2012). How does the tennis serve technique influence the serve-and-volley? *Journal of Sports Sciences*, 30(11), 1149–1156.
- Martin, C., Bideau, B., Ropars, M., Delamarche, P. et Kulpa, R. (2014). Upper limb joint kinetic analysis during tennis serve: Assessment of competitive level on efficiency and injury risks. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 24(4), 700–707.
- Martin, C., Kulpa, R., Delamarche, P. et Bideau, B. (2013). Professional tennis players' serve: correlation between segmental angular momentums and ball velocity. *Sports Biomechanics*, 12(1), 2–14.
- Martin, C., Kulpa, R., Ropars, M., Delamarche, P. et Bideau, B. (2013). Identification of pathomechanical factors during the tennis serve. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 45(11), 2113–2119.
- Mavvidis, A., Ziagkas, E. et Dallas, G. (2018). Investigating the Role of Ipsilateral and Contralateral Eye-Hand Dominance in ATP Qualification and Tennis Serve Performance of Professional Tennis Players. *International Journal of Sports and Physical Education*, 4(2), 37–41.
- Mayle, R., Ellenbecker, T. et Safran, M.R. (2009). Tennis. Dans C. Madden, M. Putukian, E. McCarthy et C. Young (dir.), *Netter's Sports Medicine* (p. 592–599). Philadelphia: Saunders.
- McCurdie, I., Smith, S., Bell, P. et Batt, M. (2017). Tennis injury data from The Championships, Wimbledon, from 2003 to 2012. *British Journal of Sports Medicine*, 51(7), 607–611.
- Meeuwisse, W., Tyreman, H., Hagel, B. et Emery, C. (2007). A dynamic model of etiology in sport injury: the recursive nature of risk and causation. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 17(3), 215–219.
- Mendez-Villanueva, A., Fernandez-Fernandez, J., Bishop, D., Fernandez-Garcia, B. et Terrados, N. (2007). Activity patterns, blood lactate concentrations and ratings of perceived exertion during a professional singles tennis tournament. *British Journal of Sports Medicine*, 41(5), 296–300.

- Mersmann, F., Bohm, S. et Arampatzis, A. (2017). Imbalances in the development of muscle and tendon as risk factor for tendinopathies in youth athletes: a review of current evidence and concepts of prevention. *Frontiers in Physiology*, 8, article 987. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00987>
- Miller, S. (2006). Modern tennis rackets, balls, and surfaces. *British Journal of Sports Medicine*, 40(5), 401–405.
- Montalvan, B., Parier, J., Brasseur, J., Le Viet, D. et Drape, J. (2006). Extensor carpi ulnaris injuries in tennis players: a study of 28 cases. *British Journal of Sports Medicine*, 40(5), 424–429.
- Montalvan, B., Parier, J., Gires, A., Brasseur, J. et Nemes, G. (2004). Results of three years medical surveillance of the international championships at Roland Garros: an epidemiological study in sports pathology. *Journal of Medicine and Science in Tennis*, 9(2), 214–215.
- Moran, K., Murphy, C. et Marshall, B. (2012). The need and benefit of augmented feedback on service speed in tennis. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 44(4), 754–760.
- Morris, M., Jobe, F., Perry, J., Pink, M. et Healy, B. (1989). Electromyographic analysis of elbow function in tennis players. *American Journal of Sports Medicine*, 17(2), 241–247.
- Mullineaux, D., Bartlett, R. et Bennett, S. (2001). Research design and statistics in biomechanics and motor control. *Journal of Sports Sciences*, 19(10), 739–760.
- Myers, N., Sciascia, A., Kibler, W. et Uhl, T. (2016). Volume-based interval training program for elite tennis players. *Sports Health*, 8(6), 536–540.
- Natsis, K., Lyrtzis, C., Papathanasiou, E. et Anastasopoulos, N. (2012). Rectus abdominis overuse injury in a tennis athlete treated with traumeel. *American Journal of Case Reports*, 13, 3–6.
- Noffal, G. et Elliott, B. (1998). *Three-dimensional kinetics of the shoulder and elbow joints in the high performance tennis serve: implications for injury* [communication]. 4th International Conference of Sports Medicine and Science in Tennis, Coral Gables, Florida.
- O'Donoghue, P. et Ballantyne, A. (2004). The impact speed of service in Grand Slam singles tennis. Dans J.F. Kahn, A. Lees et I. Maynard (dir.), *Science and racket sports III* (p. 179–184). Oxon: Routledge.
- O'Donoghue, P. et Brown, E. (2008). The Importance of Service in Grand Slam Singles Tennis. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 8(3), 70–78.
- Okholm Kryger, K., Dor, F., Guillaume, M., Haida, A., Noirez, P., Montalvan, B. et Toussaint, J. F. (2015). Medical reasons behind player departures from male and female professional tennis competitions. *American Journal of Sports Medicine*, 43(1), 34–40.
- Palmer, K., Jones, D., Morgan, C. et Zeppieri, G.J. (2018). Relationship between range of motion, strength, motor control, power, and the tennis serve in competitive-level tennis players: a pilot study. *Sports Health*, 10(5), 462–467.

- Parmelee-Peters, K. et Eathorne, S. (2005). The wrist: common injuries and management. *Primary Care: Clinics in Office Practice*, 32(1), 35–70.
- Peat, E., Culham, E. et Wilk, K. (2008). Functional anatomy of the shoulder complex. Dans K. Wilk, M. Reinold et J. Andrews (dir.), *The Athlete's Shoulder* (2e éd., p. 3–16). Churchill Livingstone.
- Perkins, R. et Davis, D. (2006). Musculoskeletal injuries in tennis. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, 17(3), 609–631.
- Pincivero, D.M., Green, R.C., Mark, J.D. et Campy R.M. (2000). Gender and muscle differences in EMG amplitude and median frequency, and variability during maximal voluntary contractions of the quadriceps femoris. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 10(3), 189–96.
- Pluim, B. (1999). Conditioning and medical aspects on the female tennis player. *ITF Coaching and Sport Science Review*, 18, 15–17.
- Pluim, B. (2007). Health benefits of tennis. *ITF Coaching and Sport Science Review*, 15, 9.
- Pluim, B., Fuller, C., Batt, M., Chase, L., Hainline, B., Miller, S., Montalvan, B., Renstrom, P., Stroia, K., Weber, K. et Wood, T. (2009). Consensus statement on epidemiological studies of medical conditions in tennis. *British Journal of Sports Medicine*, 43(12), 893–897.
- Pluim, B., Loeffen, F., Clarsen, B., Bahr, R. et Verhagen, E. (2016). A one-season prospective study of injuries and illness in elite junior tennis. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 26(5), 564–571.
- Pluim, B. et Staal, J. (2010). Tennis. Dans D. Caine, P. Harmer et M. Schiff (dir.), *Epidemiology of Injury in Olympic Sports* (p. 277–293). Wiley-Blackwell.
- Pluim, B., Staal, J., Windler, G et Jayanthi, N. (2006). Tennis injuries: occurrence, aetiology and prevention. *British Journal of Sports Medicine*, 40(5), 415–423.
- Pollard, G. N. et Pollard, G. H. (2007). Optimal risk taking on first and second serves. Dans S. Miller et J. Capel-Davis (dir.), *Tennis science & technology* (3^e éd., p. 273–280). London: International Tennis Federation.
- Post, E., Trigsted, S., Riekens, J., Hetzel, S., McGuine, T., Brooks, M. et Bell, D. (2017). The association of sport specialization and training volume with injury history in youth athletes. *American Journal of Sports Medicine*, 45(6), 1405–1412.
- Putnam, C. (1993). Sequential motions of body segments in striking and throwing skills: descriptions and explanations. *Journal of Biomechanics*, 26(S1), 125–135.
- Ramella, F. (2019, 8 Septembre). Entretien de Serena Williams après sa défaite en finale de l'US Open contre Bianca Andreescu. *L'Équipe*. <https://www.lequipe.fr/Tennis/Actualites/Serena-williams-j-aurais-pu-etre-plus-serena/1056974>
- Reece, L., Fricker, P. et Maguire, K. (1986). Injuries to elite young tennis players at Australian institute of sport. *Australian Journal of Science and Medicine in Sport*, 18(4), 11–15.

- Reed, M. P., Manary, M. A. et Schneider, L. W. (1999). Methods for measuring and representing automobile occupant posture (Technical Paper 990959). SAE Transactions. *Journal of Passengers Cars*, 108, 1–15.
- Reid, M., Crespo, M. et Santilli, L. (2009). The importance of the ITF Junior Girls' Circuit in the development of women professional tennis players. *Journal of Sports Sciences*, 27(13), 1443–1448.
- Reid, M., Crespo, M., Santilli, L., Miley, D. et Dimmock, J. (2007). The importance of the International Tennis Federation's junior boys' circuit in the development of professional tennis players. *Journal of Sports Sciences*, 25(6), 667–672.
- Reid, M., Elliott, B. et Alderson, J. (2007). Shoulder joint loading in the high performance flat and kick tennis serves. *British Journal of Sports Medicine*, 41(12), 884–889.
- Reid, M., Elliott, B. et Alderson, J. (2008). Lower-limb coordination and shoulder joint mechanics in the tennis serve. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(2), 308–315.
- Reid, M. et Giblin, G. (2015). Another day, another tennis coaching intervention, but does this one do what coaches purport? *Sports Biomechanics*, 14(2), 180–189.
- Reid, M., Giblin, G. et Whiteside, D. (2015). A kinematic comparison of the overhand throw and tennis serve in tennis players: how similar are they really? *Journal of Sports Sciences*, 33(7), 713–723.
- Reid, M., Whiteside, D. et Elliott, B. (2010). Effect of skill decomposition on racket and ball kinematics of the elite junior tennis serve. *Sports Biomechanics*, 9(4), 296–303.
- Renoult, M. (2007). Les positions de départ au service et le relais d'appuis. *FFT : la lettre du club fédéral des enseignants professionnels*, 47, 1–2.
- Rettig, A. (1998). Elbow, forearm and wrist injuries in the athlete. *Sports Medicine*, 25(2), 115–130.
- Rodríguez, C. (2012). Women's tennis: Past, present and future. *ITF Coaching and Sport Science Review*, 56, 20–21.
- Roetert, E., Ellenbecker, T. et Reid, M. (2009). Biomechanics of the Tennis serve: implications for strength training. *Strength and Conditioning Journal*, 31(4), 35–40.
- Roetert, E., McCormick, T., Brown, S. et Ellenbecker, T. (1996). Relationship between isokinetic and functional trunk strength in elite junior tennis players. *Isokinetics and Exercise Science*, 6(1), 15–20.
- Rogowski, I., Rouffet, D., Lambalot, F., Brosseau, O. et Hautier, C. (2011). Trunk and upper limb muscle activation during flat and topspin forehand drives in young tennis players. *Journal of Applied Biomechanics*, 27(1), 15–21.
- Ruiz-Cotorro, A., Ballius-Matas, R., Estruch-Massana, A. et Vilaró Angulo, J. (2006). Spondylolysis in young tennis players. *British Journal of Sports Medicine*, 40(5), 441–446.

- Ryu, R., McCormick, J., Jobe, F., Moynes, D. et Antonelli, D. (1988). An electromyographic analysis of shoulder function in tennis players. *American Journal of Sports Medicine*, 16(5), 481–485.
- Saccol, M., Gracitelli, G., da Silva, R., Laurino, C., Fleury, A., Andrade Mdos, S. et da Silva, A. (2010). Shoulder functional ratio in elite junior tennis players. *Physical Therapy in Sport*, 11(1), 8–11.
- Safran, M., Hutchinson, M., Moss, R. et Albrandt, J. (1999). *A comparison of injuries in elite boys and girls tennis players* [communication]. 9th Annual meeting of the Society for Tennis Medicine and Science, Indian Wells, CA, USA.
- Sakurai, S., Reid, M. et Elliott, B. (2013). Ball spin in the tennis serve: spin rate and axis of rotation. *Sports Biomechanics*, 12(1), 23–29.
- Sánchez-Muñoz, C., Sanz, D. et Zabala, M. (2007). Anthropometric characteristics, body composition and somatotype of elite junior tennis players. *British Journal of Sports Medicine*, 41(11), 793–799.
- Sanchis-Moysi, J., Idoate, F., Dorado, C., Alayón, S. et Calbet, J. (2010). Large asymmetric hypertrophy of rectus abdominis muscle in professional tennis players. *PLoS One*, 5(12), e15858. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0015858>
- Schönborn, R. (2002). The most important aspects of modern technique and how to develop them. *ITF Coaching and Sport Science Review*, 28, 3–5.
- Seeley, M., Uhl, T., McCrory, J., McGinn, P., Kibler, W. et Shapiro, R. (2008). A comparison of muscle activations during traditional and abbreviated tennis serves. *Sports Biomechanics*, 7(2), 248–259.
- Sell, K., Hainline, B., Yorio, M. et Kovacs, M. (2014). Injury trend analysis from the US Open Tennis Championships between 1994 and 2009. *British Journal of Sports Medicine*, 48(7), 546–551.
- Seroyer, S., Nho, S., Bach, B.J., Bush-Joseph, C., Nicholson, G. et Romeo, A. (2009). Shoulder pain in the overhead throwing athlete. *Sports Health*, 1(2), 108–120.
- Sheets, A., Abrams, G., Corazza, S., Safran, M. et Andriacchi, T. (2011). Kinematics differences between the flat, kick and slice serves measured using a markerless motion capture method. *Annals of Biomedical Engineering*, 39(12), 3011–3020.
- Silva, R., Takahashi, B., Berra, B., Cohen, M. et Matsumoto, M. (2003). Medical assistance at the Brazilian juniors tennis circuit—a one-year prospective study. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 6(1), 14–18.
- Sinaki, M., Limburg, P., Wollan, P., Rogers, J. et Murtaugh, P. (1996). Correlation of trunk muscle strength with age in children 5 to 18 years old. *Mayo Clinic Proceedings*, 71(11), 1047–1054.
- Smith, D. W. (2004). The serve. Dans D. W. Smith (dir.), *Tennis Mastery: Advance beyond the 3.5 level... And never look back!* (p. 227–248). St. George, UT: TNT Tennis Academy.

- Sögüt, M. (2016). Ball speed during the tennis serve in relation to skill level and body height. *Pamukkale Journal of Sport Science*, 7(2), 51–57.
- Spinks, A., Macpherson, A., Bain, C. et McClure, R. (2006). Injury risk from popular childhood physical activities: results from an Australian primary school cohort. *Injury Prevention*, 12(6), 390–394.
- Sprigings, E., Marshall, R., Elliott, B. et Jennings, L. (1994). A three-dimensional kinematic method for determining the effectiveness of arm segment rotations in producing racquet-head speed. *Journal of Biomechanics*, 27(3), 245–254.
- Sweeney, M., Reid, M. et Elliott, B. (2012). Lower limb and trunk function in the high performance tennis serve. *Asian Journal of Exercise and Sports Science*, 9(1), 13–20.
- Tagliafico, A., Ameri, P., Michaud, J., Derchi, L., Sormani, M. et Martinoli, C. (2009). Wrist injuries in nonprofessional tennis players: relationships with different grips. *American Journal of Sports Medicine*, 37(4), 760–767.
- Takahashi, H., Wada, T., Maeda, A., Kodama, M., Nishizono, H. et Kurata, H. (2006). The relationship between court surface and tactics in tennis using computerized scorebook. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 6(2), 15–25.
- Tanabe, S. et Ito, A. (2007). A three-dimensional analysis of the contributions of upper limb joint movements to horizontal racket head velocity at ball impact during tennis serving. *Sports Biomechanics*, 6(3), 418–433.
- Timm, K. (1995). Clinical applications of a normative database for the Cybex TEF and TORSO spinal isokinetic dynamometers. *Isokinetics and Exercise Science*, 5(1), 43–49.
- TNS-SOFRES. (2008, 5 août). *Les Français et le sport. Sondage réalisé pour la presse quotidienne nationale, régionale, urbaine gratuite et pour la presse hebdomadaire régionale*. Kantar. <https://www.tns-sofres.com/publications/les-francais-et-le-sport>
- Tubez, F., Forthomme, B., Croisier, J., Cordonnier, C., Brüls, O., Denoël, V., Berwart, G., Joris, M., Grosdent, S. et Schwartz, C. (2015). Biomechanical analysis of abdominal injury in tennis serves. A case report. *Journal of Sports Science and Medicine*, 14(2), 402–412.
- Ulbricht, A., Fernandez-Fernandez, J., Mendez-Villanueva, A. et Ferrauti, A. (2016). Impact of fitness characteristics on tennis performance in elite junior tennis players. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(4), 989–998.
- United States Racquet Stringers Association (2016, mai). *Racquet Map Selection Guide: 2016 Performance Racquets*. Tennis Industry Magazine. Récupéré le 10 février 2017 de http://www.tennisindustrymag.com/issues/201605/2016_05-racquet-map.php
- Vad, V., Gebeh, A., Dines, D., Altchek, D. et Norris, B. (2003). Hip and shoulder internal rotation range of motion deficits in professional tennis players. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 6(1), 71–75.
- van den Bogert, A. (1994). Analysis and simulation of mechanical loads on the human musculoskeletal system: a methodological overview. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 22(1), 23–51.

- Van Mechelen, J., Nauta, J., Pluim, B. et Verhagen, E. (2017). Risk factors for injuries in elite youth tennis players. *British Journal of Sports Medicine*, 51(4), 402–403.
- Vaverka, F. et Cernosek, M. (2013). Association between body height and serve speed in elite tennis players. *Sports Biomechanics*, 12(1), 30–37.
- Vaverka, F., Nykodym, J., Hendl, J., Zhanel, J. et Zahradnik, D. (2018). Association between serve speed and court surface in tennis. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 18(2), 262–272.
- Veijgen, N. (2007). *Tennis injuries : A retrospective cohort study of risk factors for tennis related injuries in the Netherlands* [Mémoire de D.E.A., Amsterdam, Pays-Bas]. Free University.
- Wagner, H., Pfusterschmied, J., Tilp, M., Landlinger, J., von Duvillard, S. 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.
- Whiteley, R. (2007). Baseball throwing mechanics as they relate to pathology and performance – A review. *Journal of Sports Science and Medicine*, 6(1), 1–20.
- Whiteside, D., Elliott, B., Lay, B. et Reid, M. (2013). The effect of age on discrete kinematics of the elite female tennis serve. *Journal of Applied Biomechanics*, 29(5), 573–582.
- Whiteside, D. et Reid, M. (2017). Spatial characteristics of professional tennis serves with implications for serving aces: a machine learning approach. *Journal of Sports Sciences*, 35(7), 648–654.
- Williams, S. et Petersen, R. (2000). Dominating serves and returns. Dans S. Williams et R. Petersen (dir.), *Serious Tennis* (p. 29–43). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Winge, S., Jorgensen, U. et Lassen Nielsen, A. (1989). Epidemiology of injuries in Danish Championship Tennis. *International Journal of Sports Medicine*, 10(5), 368–371.
- Wong, F., Keung, J., Lau, N., Ng, D., Chung, J. et Chow, D. (2014). Effects of body mass index and full body kinematics on tennis serve speed. *Journal of Human Kinetics*, 40(1), 21–28.
- Young, J., Pain, M. et Pearce, A. (2007). Experiences of Australian professional female players returning to competition from injury. *British Journal of Sports Medicine*, 41(11), 806–811.
- Young, S., Dakic, J., Stroia, K., Nguyen, M., Harris, A. et Safran, M. (2014). Hip range of motion and association with injury in female professional tennis players. *American Journal of Sports Medicine*, 42(11), 2654–2658.
- Zatsiorsky, V., Seluyanov, V. et Chugunova, L. (1990). Methods of determining mass-inertial characteristics of human body segments. Dans G. Chernyi et S. Regirer (dir.), *Contemporary problems of biomechanics* (p. 272–291). Massachussets : CRC Press.
- Zipp, P. (1982). Recommendations for the standardization of lead positions in surface electromyography. *Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 50(1), 41–54.

Liste des figures

Figure 2.1 – Représentation schématique des zones atteintes au service par les joueurs et les joueuses lors de l’Open d’Australie 2008, d’après Hizan et al. (2015).....	15
Figure 2.2 – Lors des tournois du Grand Chelem en 2007, proportion des points terminés après une frappe de balle maximum par joueur, montrant un net avantage pour le serveur (ace ou service gagnant) par rapport au relanceur (double faute ou retour gagnant), d’après Brown et O’Donoghue (2008). F : femmes, H : hommes.....	16
Figure 2.3 – Critères de performance au service pour les joueurs et les joueuses élites en fonction de l’âge, d’après Kovalchik et Reid (2017) et Hizan et al. (2011). U12 : moins de 12 ans, U16 : moins de 16 ans, U18 : moins de 18 ans, PRO : Professionnels adultes.	17
Figure 2.4 – Comparaison de la vitesse maximale de la 1 ^{ère} balle en fonction du niveau de jeu pour des garçons et des filles de trois catégories d’âge, d’après Ulbricht et al. (2016). U12 : moins de 12 ans, U14 : moins de 14 ans, U16 : moins de 16 ans, RÉG : niveau régional, NAT : niveau national. ** : P < 0,001, * : P < 0,05.....	19
Figure 2.5 – Relation entre la vitesse de balle au service et la taille des joueurs et des joueuses lors de l’US Open 2008, d’après Vaverka et Cernosek (2013).....	20
Figure 2.6 – Représentation des différences de taille, de force musculaire (test de lancer de médecine-ball) et de vitesse du service entre les joueurs et les joueuses en fonction des catégories d’âge, adaptée des travaux de Fernandez-Fernandez et al. (2014).....	23
Figure 2.7 – Les principaux éléments techniques qui déterminent la performance du service des joueurs adultes, d’après Elliott (2006). ND : non-dominant, RME : rotation maximale externe.	25
Figure 2.8 – Les différentes phases et évènements clés du service.....	27
Figure 2.9 – Évolution des vitesses linéaires articulaires au cours du service suivant une séquence proximo-distale, d’après Sheets et al. (2011).....	29
Figure 2.10 – Timing d’apparition des vitesses angulaires maximales au cours du service. RI : rotation interne, LG : longitudinale.....	30
Figure 2.11 – Exemples d’un service RA (Eugénie Bouchard, en haut) et d’un service SRA (Madison Keys, en bas).	35
Figure 2.12 – Exemple d’un MRA (à gauche) qui pourrait conduire à une frappe de balle avec un « buste cassé » (à droite), d’après Renoult (2007).	36
Figure 2.13 – Représentation des différentes actions du tronc lors de la phase d’armé et de la phase d’accélération du service, d’après Whiteside et al. (2013).	37

Figure 2.14 – Principales rotations segmentaires contribuant à la vitesse de la raquette lors du service, d’après Gordon et Dapena (2006).	38
Figure 2.15 – Évolution des vitesses segmentaires du membre supérieur en fonction de l’âge lors du service de joueuses élites, d’après Whiteside et al. (2013). RI : rotation interne, PRO : joueuses professionnelles, ** : $P < 0,01$	39
Figure 2.16 – Représentation et évolution des forces (A et C) et des moments de forces (B et D) à l’épaule et au coude au cours du service, d’après Noffal et Elliott (1998) et Luera et al. (2018). FMC : flexion maximale du coude, PLBR : point le plus bas de la raquette dans le dos, RME : rotation maximale externe de l’épaule, IMP : impact.	42
Figure 2.17 – Localisation et type des blessures retrouvées dans une population de jeunes joueurs et joueuses élites, âgés de 11 à 13 ans, d’après Pluim et al. (2016).....	50
Figure 2.18 – Représentation théorique de l’évolution de la douleur dans le cas d’une blessure chronique, d’après Bahr (2009).....	51
Figure 2.19 – Dyskinésie scapulaire chez un jeune joueur de tennis au niveau des deux épaules, caractérisée par une proéminence du bord inférieur de la scapula, d’après Manske et Ellenbecker (2013).	53
Figure 2.20 – Le mécanisme reconnu dans la littérature pour les blessures au dos et aux abdominaux fait référence aux mouvements d’extension, de rotation longitudinale et d’inclinaison latérale du tronc lors de la phase d’armé du service.....	56
Figure 2.21 – Modèle dynamique de l’étiologie des blessures au tennis, représentant l’interaction entre les facteurs intrinsèques, les facteurs extrinsèques et le risque traumatique, adapté de Meeuwisse et al. (2007).	58
Figure 2.22 – Distribution des fractures de fatigue en fonction de l’âge chez des joueurs et des joueuses de tennis, d’après l’étude de Maquirriain et Ghisi (2006).....	59
Figure 2.23 – Distribution des blessures (en %) chez les jeunes joueurs et joueuses élites, d’après Gescheit et al. (2018).....	61
Figure 2.24 – Représentation schématique au niveau de l’épaule de la perte d’amplitude en rotation interne et du gain d’amplitude en rotation externe parfois associé, d’après Seroyer et al. (2009). ER : rotation externe, IR : rotation interne, TM : amplitude totale.....	63
Figure 2.25 – Nombre de matchs disputés en simple sur une saison sportive par les vainqueurs, finalistes et demi-finalistes des championnats de France 2016, 2017 et 2018 (* : en 2016 et 2017, les championnats de France 11/12 ans ont été organisés par équipe).....	65
Figure 2.26 – Phénomène d’hyperangulation de l’épaule, avec un léger retard du bras sur le tronc lors de la phase d’armé, d’après Martin (2013).	68
Figure 2.27 – Service en plateau (à gauche) avec un tamis orienté vers le ciel au départ de la boucle par rapport à un service plus « conventionnel » (à droite).	69

Figure 4.1 – Modèle de placement des marqueurs sur le sujet (à gauche) et représentation des marqueurs additionnels sur la raquette (à droite). MR : extrémité du manche de la raquette, CR : cœur de la raquette, TR : tête de la raquette, CGR et CDR : côtés gauche et droit du tamis de la raquette.	76
Figure 4.2 – Représentation schématique du protocole de l'étude pour un joueur droitier (les caméras placées sur la coursive n'ont pas été représentées).....	77
Figure 4.3 – Reconstruction de la position 3D (à gauche) et labellisation (au centre) des marqueurs au cours du service. La figure de droite représente le joueur au service au même instant.....	77
Figure 4.4 – Joueuse au service au cours de l'expérimentation.....	78
Figure 4.5 – Variables cinématiques mesurées au cours du service. PLHR : point le plus haut de la raquette lors de l'armé.....	80
Figure 4.6 – Représentation des forces (flèches noires) et des moments de forces (flèches blanches) calculés au poignet, au coude et à l'épaule.	81
Figure 5.1 – Vitesse du 1 ^{er} service en fonction de l'âge des joueurs. *** : P < 0,001, ** : P < 0,01.....	87
Figure 5.2 – Représentation schématique d'une vue de dessus (à gauche) et d'une vue de côté (à droite) montrant la position latérale (axe X), antéropostérieure (axe Y) et verticale (axe Z) de l'impact du 1 ^{er} service en fonction de l'âge des joueurs. *** : P < 0,001, * : P < 0,05.....	87
Figure 5.3 – Timings d'apparition des vitesses angulaires maximales au cours du 1 ^{er} service en fonction de l'âge des joueurs. * : P < 0,05. RI : rotation interne, AP : antéropostérieure, LG : longitudinale.....	89
Figure 5.4 – Vitesse du 1 ^{er} service en fonction de l'âge des joueuses. * : P < 0,05.....	91
Figure 5.5 – Représentation schématique d'une vue de dessus (à gauche) et d'une vue de côté (à droite) montrant la position latérale (axe X), antéropostérieure (axe Y) et verticale (axe Z) de l'impact du 1 ^{er} service en fonction de l'âge des joueuses. ** : P < 0,01.	91
Figure 5.6 – Timings d'apparition des vitesses angulaires maximales au cours du 1 ^{er} service en fonction de l'âge des joueuses. RI : rotation interne, AP : antéropostérieure, LG : longitudinale.	93
Figure 5.7 – Répartition du nombre de joueurs et de joueuses blessés par région anatomique en fonction de l'âge et du sexe.	98
Figure 5.8 – Comparaison de la vitesse du 1 ^{er} service mesurée pour les sous-groupes de notre étude avec les données disponibles pour des jeunes joueurs et joueuses de niveau national (Ulbricht et al., 2016) et pour des joueurs et des joueuses professionnels adultes (Elliott et al., 2003; Vaverka et al., 2018).....	99
Figure 5.9 – Classement mondial des 10 meilleurs joueurs et joueuses de moins de 18 ans à la fin de la saison 2019 (www.atptour.com et www.wtatennis.com).	100

Figure 5.10 – L’optimisation du service chez les garçons entre 12 et 16 ans passe par une amélioration de l’explosivité de la poussée des jambes (1) et par une augmentation de la vitesse de rotation antéropostérieure du tronc (2).	103
Figure 5.11 – Exemple de deux joueuses au moment du début de la descente de la raquette dans le dos, avec un vissage des épaules par rapport aux hanches plus prononcé pour une joueuse de 13 ans (à gauche) que pour une joueuse de 19 ans (à droite).	105
Figure 5.12 – Représentation de l’inclinaison latérale maximale du tronc chez un joueur professionnel, d’après Kovacs et Ellenbecker (2011).	109
Figure 5.13 – Impact de balle sur un 1 ^{er} service à plat (à gauche) et sur un 2 nd service lifté (à droite) pour un joueur de 12 ans.	113
Figure 5.14 – Représentation de deux joueurs professionnels droitiers, l’un avec l’œil directeur droit (joueur dit « homogène », à gauche) et l’autre avec l’œil directeur gauche (joueur dit « croisé », à droite), d’après Mavvidis et al. (2018).	116
Figure 5.15 – Vitesse du service en fonction de l’âge (en haut), du classement FFT (en bas à gauche) et de la taille (en bas à droite) chez les joueurs élites.	118
Figure 5.16 – Vitesse du service en fonction de l’âge (en haut), du classement FFT (en bas à gauche) et de la taille (en bas à droite) chez les joueuses élites.	119
Figure 5.17 – Représentation de quelques éléments techniques du service maîtrisés chez les garçons et chez les filles dès l’âge de 12 ans. PLHR : point le plus haut de la raquette.	120
Figure 5.18 – Situation d’entraînement avec un service avancé pour favoriser la vitesse de balle et les intentions tactiques offensives chez une joueuse de 11 ans (à gauche, service sur la ligne de carré de service) et chez une joueuse de 12 ans (à droite, service de la ligne de 18 m). ...	120
Figure 5.19 – Exemple d’un joueur professionnel au service et recommandations concernant l’optimisation de la vitesse de rotation antéropostérieure du tronc.	121
Figure 5.20 – Joueuse avec un angle de séparation très prononcé au début de la descente de la raquette dans le dos.	122
Figure 5.21 – Exemple d’exercices sous-maximaux pour améliorer la force et l’endurance musculaire du membre supérieur, d’après Ellenbecker et al. (2009). A : rotation externe de l’épaule à 90° d’abduction, B : tirage horizontal sur un ballon de fitness, C : dribbles contre le mur avec le bras en élévation, D : exercice plyométrique de dribble avec le poignet.	122
Figure 6.1 – Service RA (à gauche) et service SRA (à droite) chez un joueur professionnel qui a modifié sa technique de service suite à une problématique de blessure au niveau du genou arrière.	126
Figure 6.2 – Exemple d’un MRA (au premier plan) et d’un BRA (au second plan) chez deux joueuses professionnelles.	127

Figure 6.3 – Schéma récapitulatif du déroulé de l'étude 2. Partie 1 : comparaison du service avec relais d'appuis (RA) et sans relais d'appuis (SRA) chez les garçons et les filles. Partie 2 : comparaison du bon relais d'appuis (BRA) et du mauvais relais d'appuis (MRA) chez les filles. Le BRA et le MRA n'ont pas été comparés chez les garçons en raison de la taille du groupe MRA (n = 6).....	128
Figure 6.4 – Représentation schématique de la mesure de l'écartement des pieds au service.	130
Figure 6.5 – Comparaison par sexe des contraintes articulaires maximales du membre supérieur dominant en fonction du type d'appuis utilisé au service. ** : P < 0,01. PROX : proximale, ANT : antérieure, INF : inférieure, MÉD : médiale, RI : rotation interne, ABD : abduction, ADDH : adduction horizontale, ABDH : abduction horizontale, VAR : varus.....	134
Figure 6.6 – Répartition du nombre de joueurs et de joueuses blessés par région anatomique en fonction du type d'appuis utilisé au service.....	135
Figure 6.7 – Représentation de la position moyenne du pied arrière au moment de la flexion maximale du genou arrière pour le groupe BRA (en orange) et le groupe MRA (en jaune). La jambe avant est représentée en rouge sur la figure.....	136
Figure 6.8 – Comparaison des timings d'apparition des vitesses angulaires maximales au service en fonction de la réalisation technique du relais d'appuis. * : P < 0,05. AP : antéropostérieure, LG : longitudinale.....	139
Figure 6.9 – Comparaison des contraintes articulaires maximales du membre supérieur dominant en fonction de la réalisation technique du relais d'appuis chez les joueuses. PROX : force proximale, ANT : force antérieure, INF : force inférieure, MÉD : force médiale, RI : moment de rotation interne, ABD : moment d'abduction, ADDH : moment d'adduction horizontale, ABDH : moment d'abduction horizontale, VAR : moment de varus.....	140
Figure 6.10 – Répartition du nombre de joueuses blessées au niveau du membre supérieur et du tronc en fonction de la réalisation technique du relais d'appuis.	141
Figure 6.11 – Évolution de la rotation longitudinale des hanches et de l'angle de séparation au cours du service en fonction du type d'appuis chez les filles. LB : lancer de balle, RME : rotation maximale externe de l'épaule, IMP : impact de balle.	145
Figure 6.12 – Reconstruction 3D du service d'une joueuse SRA (à gauche) et d'une joueuse RA (à droite) au moment de l'impact de balle (vue de côté).....	147
Figure 6.13 – Joueuse professionnelle avec un mauvais relais d'appuis au service (MRA), conduisant à un angle de séparation très important lorsque la raquette descend dans le dos (figure au centre), d'après Ellenbecker (2006).	151
Figure 6.14 – Représentation 3D du service d'une joueuse blessée au dos, avec au début de la poussée un maintien du vissage des hanches par rapport au filet malgré un mauvais relais d'appuis et une « ligne de pied » parallèle au filet.....	151
Figure 7.1 – Modification de la technique de service de Novak Djokovic entre 2010 (service en plateau, à gauche) et 2013 (service normal, à droite).....	156

Figure 7.2 – Axes de la raquette. X1 : axe transverse, Y1 : axe longitudinal, Z1 : axe perpendiculaire ou normal, MR : extrémité du manche de la raquette, CR : cœur de la raquette, TR : tête de la raquette, CGR et CDR : côtés gauche et droit du tamis de la raquette.....	157
Figure 7.3 – Représentation d'un joueur avec un service en plateau.	157
Figure 7.4 – Représentation du repère de la main (à gauche), du calcul de la prise de raquette et de l'angle de la raquette (à droite).....	158
Figure 7.5 – Moyenne de la rotation externe / rotation interne de l'épaule, de l'abduction horizontale / adduction horizontale de l'épaule, de l'abduction / adduction de l'épaule et de la flexion / extension du poignet entre les deux groupes pendant le mouvement de service. ACC : phase d'accélération, DÉC : phase de décélération, MDP : moment du plateau, RME : rotation maximale externe de l'épaule.	163
Figure 7.6 – Représentation des huit faces du manche de la raquette, des repères anatomiques de la main (A) et des prises « continentale » et « semi-fermée de coup droit » (B et C, la position de la main est identique mais l'inclinaison de la raquette est différente), d'après Tagliafico et al. 2009.	167
Figure 7.7 – Situation d'apprentissage utilisant le service avec une préparation compacte pour faciliter le positionnement du coude au début de la phase d'armé et le maintien de celui-ci lors de la descente de la raquette dans le dos.....	168

Liste des tableaux

Tableau 2.1 – Vitesses maximales et vitesses moyennes de la 1 ^{ère} balle et de la 2 ^{nde} balle (moyenne ± écart-type) mesurées lors des tournois du Grand Chelem en 2016, d’après Vaverka et al. (2018).	18
Tableau 2.2 – Vitesses angulaires maximales (moyenne ± écart-type) retrouvées lors du service chez des joueurs et des joueuses adultes de haut niveau, ainsi que chez des jeunes joueuses élites. H : hommes, F : femmes, RI : rotation interne, LG : longitudinale, AV : avant, AR : arrière.....	31
Tableau 2.3 – Comparaison des variables cinématiques des membres inférieurs en fonction de l’âge des joueuses élites, d’après Whiteside et al. (2013), et synthèse des données retrouvées dans la littérature pour les joueurs élites adultes, d’après Elliott et al. (2013). U12 : moins de 12 ans, U16 : moins de 16 ans, AR : arrière, AV : avant, ** : P < 0,01 pour les différences entre les joueuses U12 et les joueuses professionnelles, §§ : P < 0,01 pour les différences entre les joueuses U16 et les joueuses professionnelles.	33
Tableau 2.4 – Évaluation de la sévérité de la blessure en fonction du nombre de jours d’arrêt de la pratique du tennis, d’après Pluim et al. (2009).	44
Tableau 2.5 – Incidence et localisation des blessures rapportées chez des joueurs et des joueuses adultes, professionnels ou élites, au cours de différentes études. Pro : professionnel, E : entraînement, C : compétition.	46
Tableau 2.6 – Incidence et localisation des blessures chez des jeunes joueurs et joueuses élites au cours de différentes études. U12 : moins de 12 ans, U14 : moins de 14 ans, U16 : moins de 16 ans, U18 : moins de 18 ans, NR : nombre de joueurs et joueuses non renseigné, E : entraînement, C : compétition.	48
Tableau 4.1 – Récapitulatif des analyses biomécaniques réalisées au cours de ce travail de thèse.	74
Tableau 4.2 – Repères anatomiques pour le placement des marqueurs sur le corps du sujet. .	75
Tableau 5.1 – Caractéristiques des joueurs de l’étude 1. *** : P < 0,001, ** : P < 0,01, * : P < 0,05. La variable en gras tend à être différente (0,05 < P < 0,1). RA : relais d’appuis. I _T , I _N et I _L : moments d’inertie de la raquette autour de l’axe transverse (I _T), de l’axe normal (I _N) et de l’axe longitudinal (I _L).	85
Tableau 5.2 – Caractéristiques des joueuses de l’étude 1. *** : P < 0,001. Les variables en gras tendent à être différentes (0,05 < P < 0,1). RA : relais d’appuis. I _T , I _N et I _L : moments d’inertie de la raquette autour de l’axe transverse (I _T), de l’axe normal (I _N) et de l’axe longitudinal (I _L).	85

Tableau 5.3 – Variables cinématiques des membres inférieurs au cours du 1^{er} service en fonction de l'âge des joueurs. *** : P < 0,001, ** : P < 0,01, * : P < 0,05. Les variables en gras tendent à être différentes (0,05 < P < 0,1). AR : arrière, AV : avant.88

Tableau 5.4 – Variables cinématiques du tronc et du membre supérieur dominant au cours du 1^{er} service en fonction de l'âge des joueurs. * : P < 0,05. max : maximal, min : minimal, LG : longitudinale, ABD : abduction, ABDHOR : abduction horizontale, ADDHOR : adduction horizontale, RME : rotation maximale externe, V_M : vitesse maximale, RI : rotation interne, AP : antéropostérieure.89

Tableau 5.5 – Valeurs maximales de contraintes articulaires générées au cours du 1^{er} service en fonction de l'âge des joueurs. ** : P < 0,01, * : P < 0,05. Les variables en gras tendent à être différentes (0,05 < P < 0,1). N : newton.90

Tableau 5.6 – Variables cinématiques des membres inférieurs au cours du 1^{er} service en fonction de l'âge des joueuses. *** : P < 0,001, ** : P < 0,01, * : P < 0,05. AR : arrière, AV : avant. .92

Tableau 5.7 – Variables cinématiques du tronc et du membre supérieur dominant au cours du 1^{er} service en fonction de l'âge des joueuses. * : P < 0,05. Les variables en gras tendent à être différentes (0,05 < P < 0,1). max : maximal, min : minimal, LG : longitudinale, ABD : abduction, ABDHOR : abduction horizontale, ADDHOR : adduction horizontale, RME : rotation maximale externe, V_M : vitesse maximale, RI : rotation interne, AP : antéropostérieure.93

Tableau 5.8 – Valeurs maximales de contraintes articulaires générées au cours du 1^{er} service en fonction de l'âge des joueuses. ** : P < 0,01. N : newton.....94

Tableau 5.9 – Comparaison des caractéristiques des sujets et des variables cinématiques au service en fonction du sexe chez le moins de 14 ans. ** : P < 0,01, * : P < 0,05. Les variables en gras tendent à être différentes (0,05 < P < 0,1). LG : longitudinale, V_M : vitesse maximale, AR : arrière, AV : avant, max : maximal, min : minimal, ABD : abduction, RI : rotation interne, AP : antéropostérieure.95

Tableau 5.10 – Comparaison des caractéristiques des sujets et des variables cinématiques au service en fonction du sexe chez les moins de 16 ans. *** : P < 0,001, ** : P < 0,01, * : P < 0,05. Les variables en gras tendent à être différentes (0,05 < P < 0,1). LG : longitudinale, V_M : vitesse maximale, AR : arrière, AV : avant, max : maximal, min : minimal, ABD : abduction, RI : rotation interne, AP : antéropostérieure.96

Tableau 5.11 – Comparaison des caractéristiques des sujets et des variables cinématiques au service en fonction du sexe chez les plus de 16 ans. *** : P < 0,001, ** : P < 0,01, * : P < 0,05. La variable en gras tend à être différente (0,05 < P < 0,1). LG : longitudinale, V_M : vitesse maximale, AR : arrière, AV : avant, max : maximal, min : minimal, ABD : abduction, RI : rotation interne, AP : antéropostérieure.....97

Tableau 6.1 – Comparaison des caractéristiques des sujets et de leur raquette en fonction du type d'appuis utilisé au service. ** : P < 0,01. I_T, I_N et I_L : moments d'inertie de la raquette autour de l'axe transverse (I_T), de l'axe normal (I_N) et de l'axe longitudinal (I_L). 129

Tableau 6.2 – Comparaison des caractéristiques des joueuses et de leur raquette en fonction de la réalisation technique du relais d'appuis. L'écart entre les chevilles représente la position latérale (X) et antéropostérieure (Y) de la cheville arrière par rapport à la cheville avant au moment de la poussée des jambes. *** : $P < 0,001$, ** : $P < 0,01$. I_T , I_N et I_L : moments d'inertie de la raquette autour de l'axe transverse (I_T), de l'axe normal (I_N) et de l'axe longitudinal (I_L).	129
Tableau 6.3 – Comparaison par sexe des variables cinématiques des membres inférieurs en fonction du type d'appuis utilisé au service. *** : $P < 0,001$, ** : $P < 0,01$, * : $P < 0,05$. Les variables en gras tendent à être différentes ($0,05 < P < 0,1$). AR : arrière, AV : avant.	132
Tableau 6.4 – Comparaison par sexe des variables cinématiques du tronc et du membre supérieur dominant en fonction du type d'appuis utilisé au service. ** : $P < 0,01$, * : $P < 0,05$. Les variables en gras tendent à être différentes ($0,05 < P < 0,1$). LG : longitudinale, ABDHOR : abduction horizontale, ADDHOR : adduction horizontale, RME : rotation maximale externe, ABD : abduction, RI : rotation interne, AP : antéropostérieure.....	133
Tableau 6.5 – Comparaison par sexe des caractéristiques de l'impact de balle en fonction du type d'appuis utilisé au service. Les variables en gras tendent à être différentes ($0,05 < P < 0,1$).	133
Tableau 6.6 – Comparaison des variables cinématiques des membres inférieurs en fonction de la réalisation technique du relais d'appuis. AR : arrière, AV : avant.....	137
Tableau 6.7 – Comparaison des variables cinématiques du tronc et du membre supérieur dominant en fonction de la réalisation technique du relais d'appuis. Les variables en gras tendent à être différentes ($0,05 < P < 0,1$). LG : longitudinale, ABDHOR : abduction horizontale, ADDHOR : adduction horizontale, RME : rotation maximale externe, ABD : abduction, RI : rotation interne, AP : antéropostérieure.....	138
Tableau 6.8 – Comparaison des caractéristiques de l'impact de balle en fonction de la réalisation technique du relais d'appuis.....	139
Tableau 6.9 – Comparaison du positionnement des pieds et de la rotation longitudinale des hanches au début de la poussée des jambes entre des joueuses MRA blessées au dos et des joueuses MRA non blessées à cet endroit. ** : $P < 0,01$	141
Tableau 7.1 – Comparaison des données anthropométriques, de la vitesse de balle et des caractéristiques des raquettes entre les deux groupes.....	159
Tableau 7.2 – Valeurs maximales des contraintes articulaires du membre supérieur entre les deux groupes. ** : $P < 0,01$, * : $P < 0,05$. Les variables en gras tendent à être différentes ($0,05 < P < 0,1$). N : Newton.	160
Tableau 7.3 – Récapitulatif du nombre de joueurs blessés (% de joueurs dans le groupe), du nombre total de blessures (% des blessures dans le groupe) et de la durée moyenne d'arrêt par blessure pour chaque articulation du membre supérieur. Les variables en gras tendent à être différentes ($0,05 < P < 0,1$).	161

Tableau 7.4 – Comparaison des variables cinématiques obtenues pour les deux groupes lors du service. *** : $P < 0,001$, ** : $P < 0,01$, * : $P < 0,05$. Les variables en gras tendent à être différentes ($0,05 < P < 0,1$). MDP : Moment du plateau, RME : rotation maximale externe.
..... 162

Annexes

Annexe 1. Exemple d'un compte-rendu sur l'analyse biomécanique du service

ANALYSE BIOMECANIQUE

.....
.....
.. ans
.m..
.. kg



Droitier
Classement
.....

..... 2016

Services

Laboratoire « Mouvement, Sport, Santé »

Rédacteur : Pierre Touzard - pierre.touzard@hotmail.fr

Responsable scientifique du projet : Caroline Martin - caromartin@numericable.fr

Directeur de thèse / Directeur laboratoire : Benoît Bideau - benoit.bideau@univ-rennes2.fr

Co-directeur de thèse : Richard Kulpa - richard.kulpa@univ-rennes2.fr



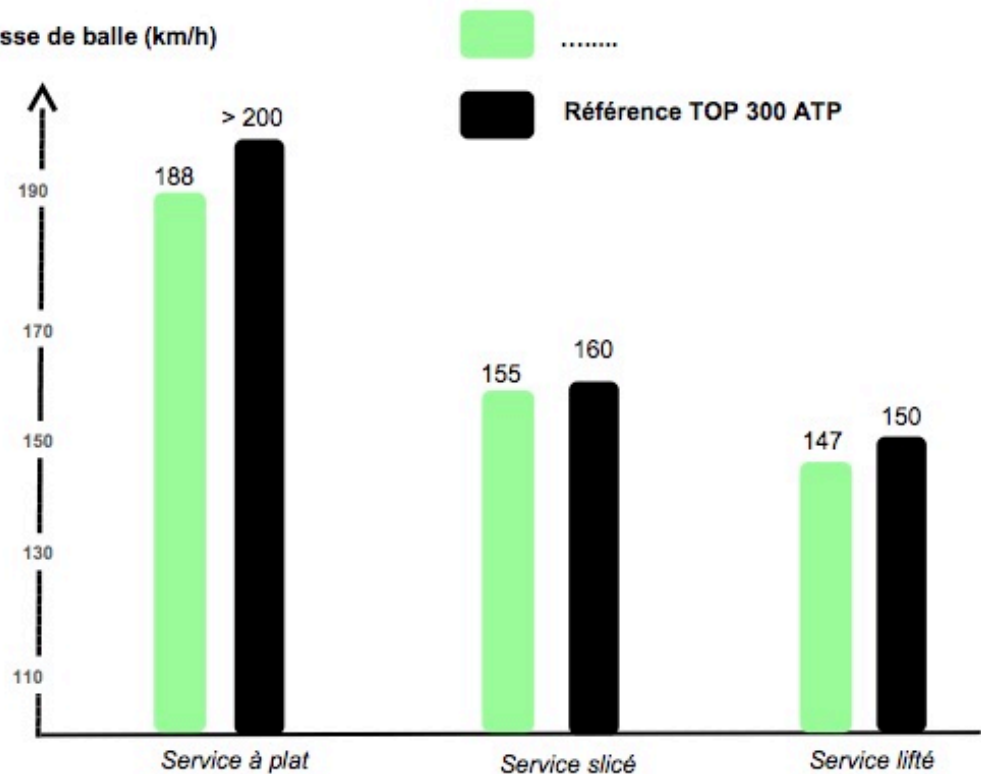


ANALYSE BIOMECHANIQUE

.....
.....
.././2016

● Vitesse de balle (3 services les + puissants)

Vitesse de balle (km/h)



● Comparaison des vitesses lors des différentes modalités

Critères de performance (1 ^{ère} balle sur le T)	Technique habituelle	Pieds alignés	Relais d'appuis	Pieds Joints
Vitesse maximale (km/h)	191 km/h	193 km/h	197 km/h	201 km/h
Moyenne de tous les services* (km/h)	187 km/h	186 km/h	187 km/h	188 km/h
Vitesse maximale de la tête de raquette à l'impact (km/h)	168 km/h	167 km/h	175 km/h	169 km/h

*: Pour chacune des modalités, la moyenne a été calculée en prenant en compte tous les services, à l'exception du service le plus rapide et du service le moins rapide.

ANALYSE BIOMECHANIQUE

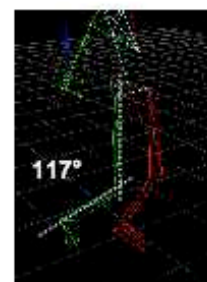
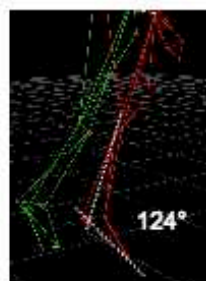
.....

/2016

● Critères de performance du membre inférieur

Critères de performance (1 ^{ère} balle sur le T)	Technique Habituelle	Pieds Alignés	Relais d'Appuis	Pieds Jointés	TOP 300 ATP
Angle interne de flexion du genou avant	115°	111°	112°	113°	100° ± 10°
Angle interne de flexion du genou arrière	117°	117°	99°	111°	95° ± 10°
Vitesse d'extension du genou avant	614°/s	585°/s	654°/s	639°/s	> 600°/s
Vitesse d'extension du genou arrière	318°/s	332°/s	482°/s	474°/s	> 700°/s
Vitesse d'extension de la cheville avant	409°/s	401°/s	462°/s	420°/s	> 650°/s
Vitesse d'extension de la cheville arrière	677°/s	657°/s	696°/s	758°/s	> 750°/s
Vitesse verticale hanche avant	1,6 m/s	1,6 m/s	1,8 m/s	1,8 m/s	2,0 m/s
Vitesse verticale hanche arrière	2,1 m/s	2,1 m/s	2,3 m/s	2,2 m/s	2,5 m/s

- Les critères de performance de la propulsion du corps par les jambes peuvent être améliorés chez En effet, **les vitesses de propulsion verticale des hanches**, qui constituent un très bon reflet de l'explosivité de la poussée au service, sont inférieures aux valeurs de référence attendues à haut-niveau.
- **Une amélioration de la vitesse d'extension de la cheville avant** semble pouvoir être envisagée, notamment grâce à un meilleur travail du pied lors de la poussée (extension maximale = 124 °, voir photo ci-dessous, à gauche => recherche d'une extension plus complète).
- De même, **la vitesse d'extension du genou arrière** peut être améliorée. Une augmentation de la mise en charge de cette jambe peut être visée (voir photo ci-dessous, à droite).
- Lorsque ressert les pieds pour servir, et surtout lorsqu'il utilise un relais d'appuis, **toutes les vitesses articulaires des membres inférieurs sont améliorées.**

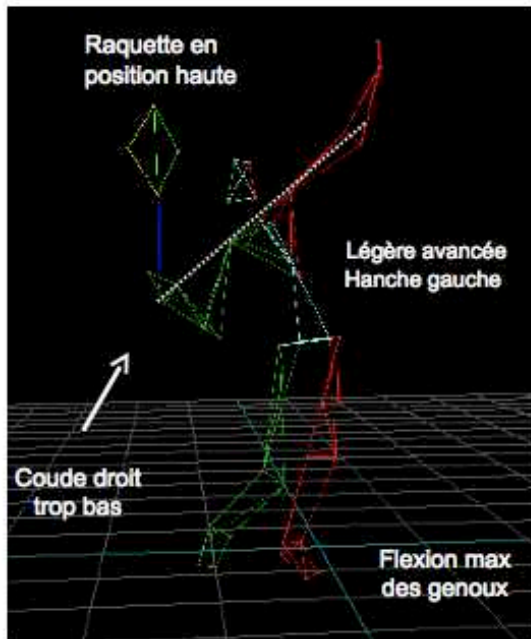


ANALYSE BIOMECHANIQUE

.....

 .././2016

● Position d'armé et synchronisation haut et bas du corps



Critères de performance (1er service T)	Référence	Corrections possibles
Position d'armé		Alignement coude droit, épaule droite, épaule gauche	Remonter le coude ?

La position d'armé de peut être améliorée. En effet, lorsque la raquette est en position haute, le placement du **coude droit** semble **légèrement trop bas** (cf. Federer, à droite).

Le timing de est bon puisqu'il synchronise bien le début de sa poussée avec la raquette en position haute.

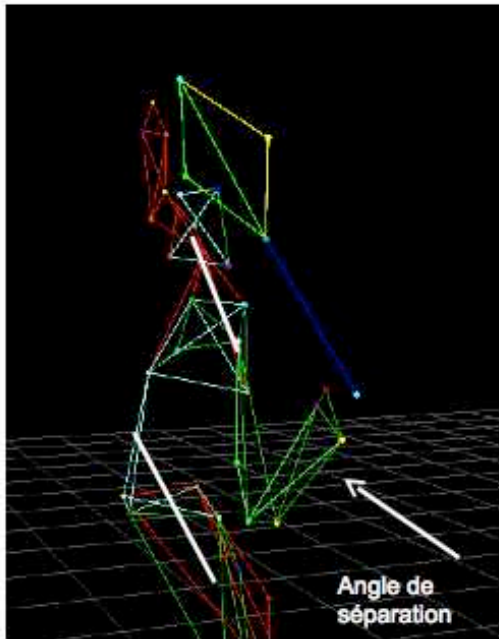
Enfin, nous observons une **légère avancée de la hanche gauche** vers le haut et vers l'avant à la suite du lancer de balle (inclinaison latérale du tronc = 19°, référence = <15°, voir dernière page). donne l'impression de « couler » très légèrement vers l'avant plutôt que de descendre vers le bas.

ANALYSE BIOMECHANIQUE

.....

/2016

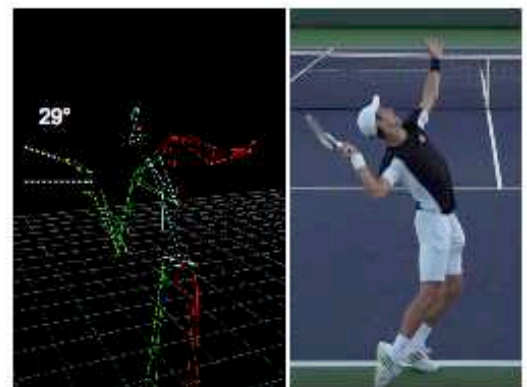
● Angle de séparation et raquette en plateau lors du service



Critères de performance (1er service T)	Référence	Corrections possibles
Angle de séparation entre ligne des hanches et celle des épaules	- 3°	20 - 30°	+ 25 ° ?

..... ne crée pas d'angle de séparation (« vissage ») entre la rotation de la ligne des épaules et celle des hanches. Ceci aurait pour effet d'augmenter significativement les vitesses de rotation des hanches et des épaules (voir chaîne segmentaire).

Nous observons également **une descente de raquette en plateau** chez D'après nos résultats préliminaires, cette organisation peut être corrigée car elle est susceptible d'augmenter les contraintes au niveau du coude et de l'épaule lors du service, sans influence sur la performance en terme de vitesse (Cf. service Djokovic, corrections apportées durant sa carrière).



ANALYSE BIOMECHANIQUE

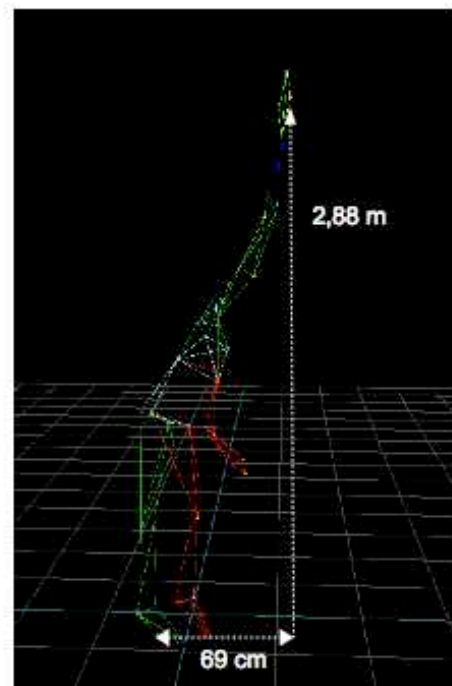
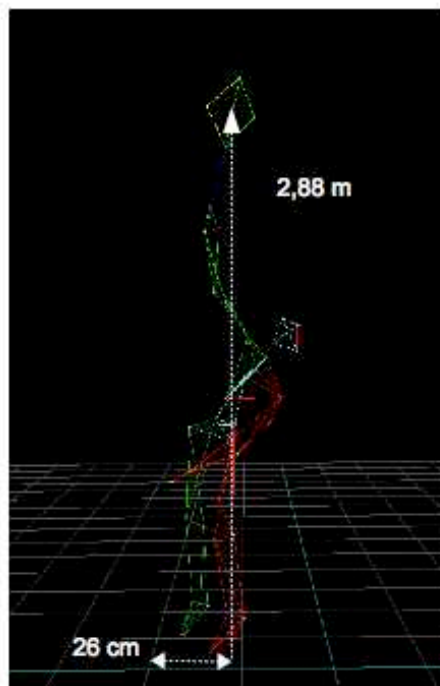
.....

 .././2016

● Position de l'impact (Premier service sur le T)

Critères de performance (1er service T)	Technique habituelle	Pieds Alignés	Relais Appuis	Pieds Jointés	TOP 300 ATP
Hauteur de décollage à l'impact	17 cm	18 cm	20 cm	17 cm	20 - 30 cm
Hauteur d'impact avec la balle	2,88 m	2,88 m	2,89 m	2,83 m	2,86 m
Hauteur d'impact relative à la taille de	1,51 x taille	1,51 x taille	1,51 x taille	1,48 x taille	1,50 x taille
Position du point d'impact vers l'avant	69 cm	69 cm	66 cm	91 cm	60 – 80 cm
Position latérale du point d'impact par rapport au pied avant	26 cm	10 cm	29 cm	6 cm	10 – 20 cm

La position du point d'impact de la balle est **correcte vers l'avant**, et très **légèrement trop à gauche** si on la compare aux valeurs de référence. **Les hauteurs de point d'impact et de décollage sont bonnes** chez



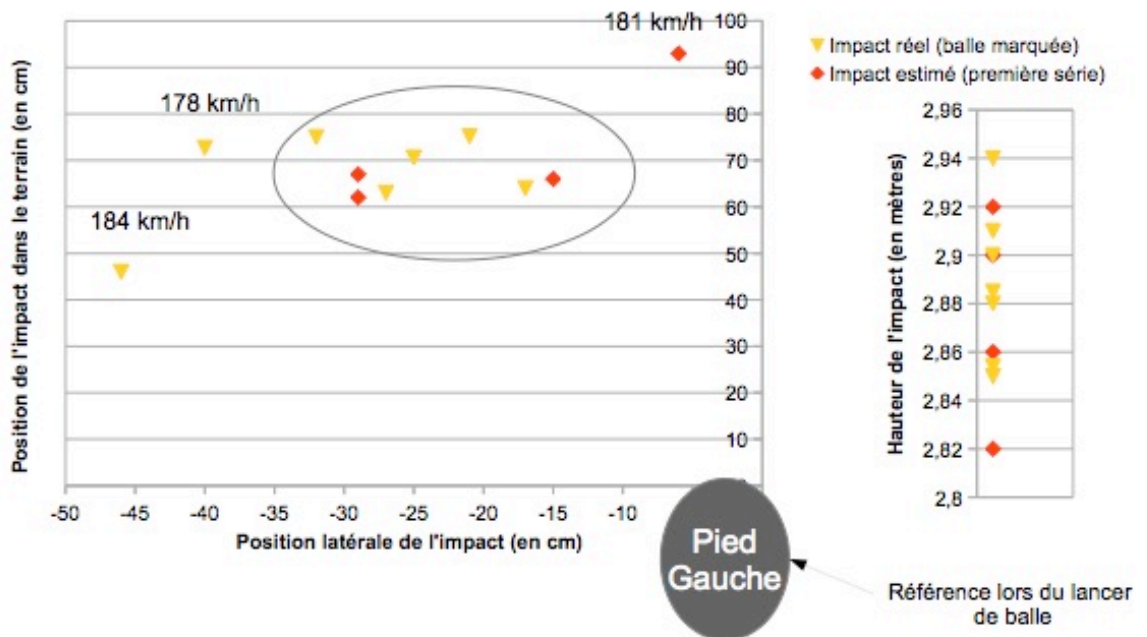
(NB : Les distances sont données par rapport à la position initiale du pied gauche lors du lancer de balle).

ANALYSE BIOMECHANIQUE

.....

/2016

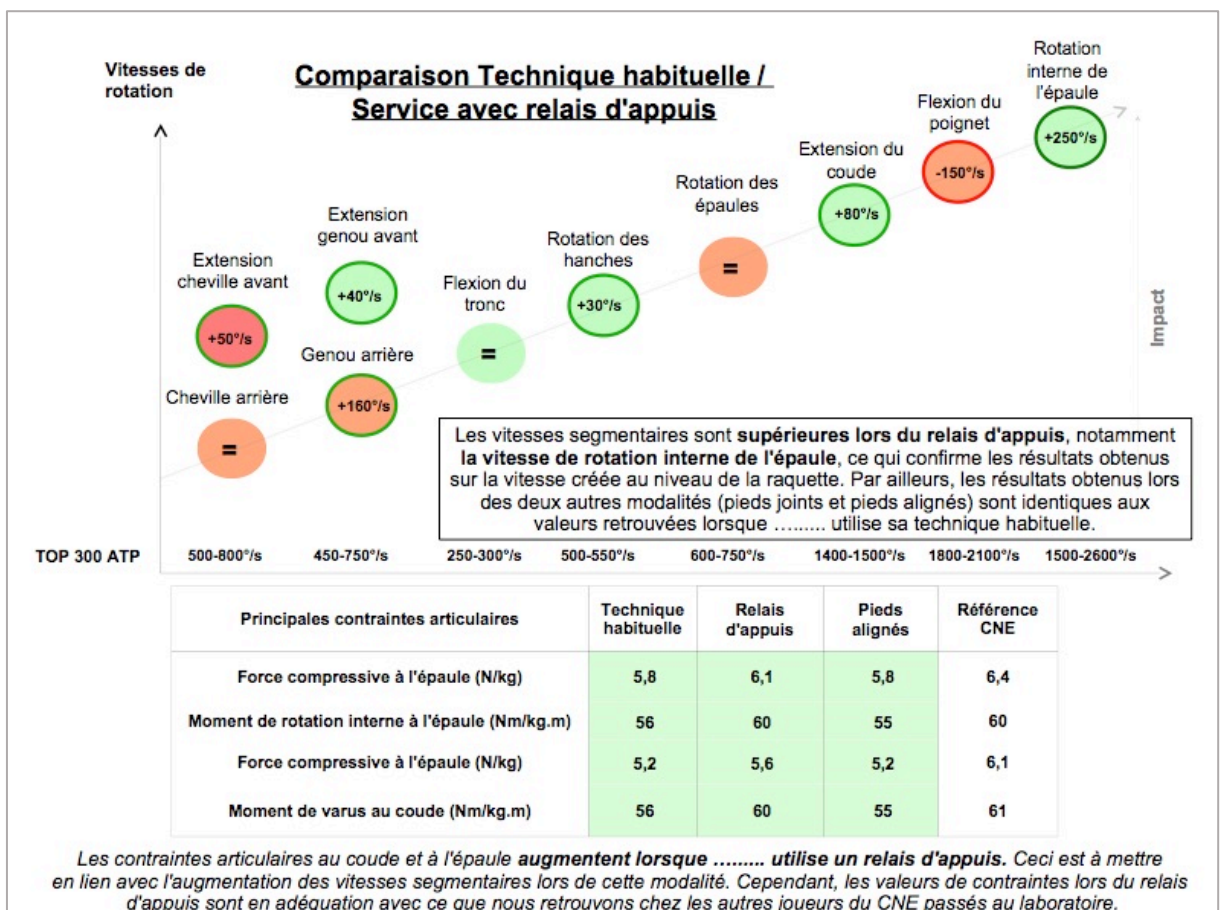
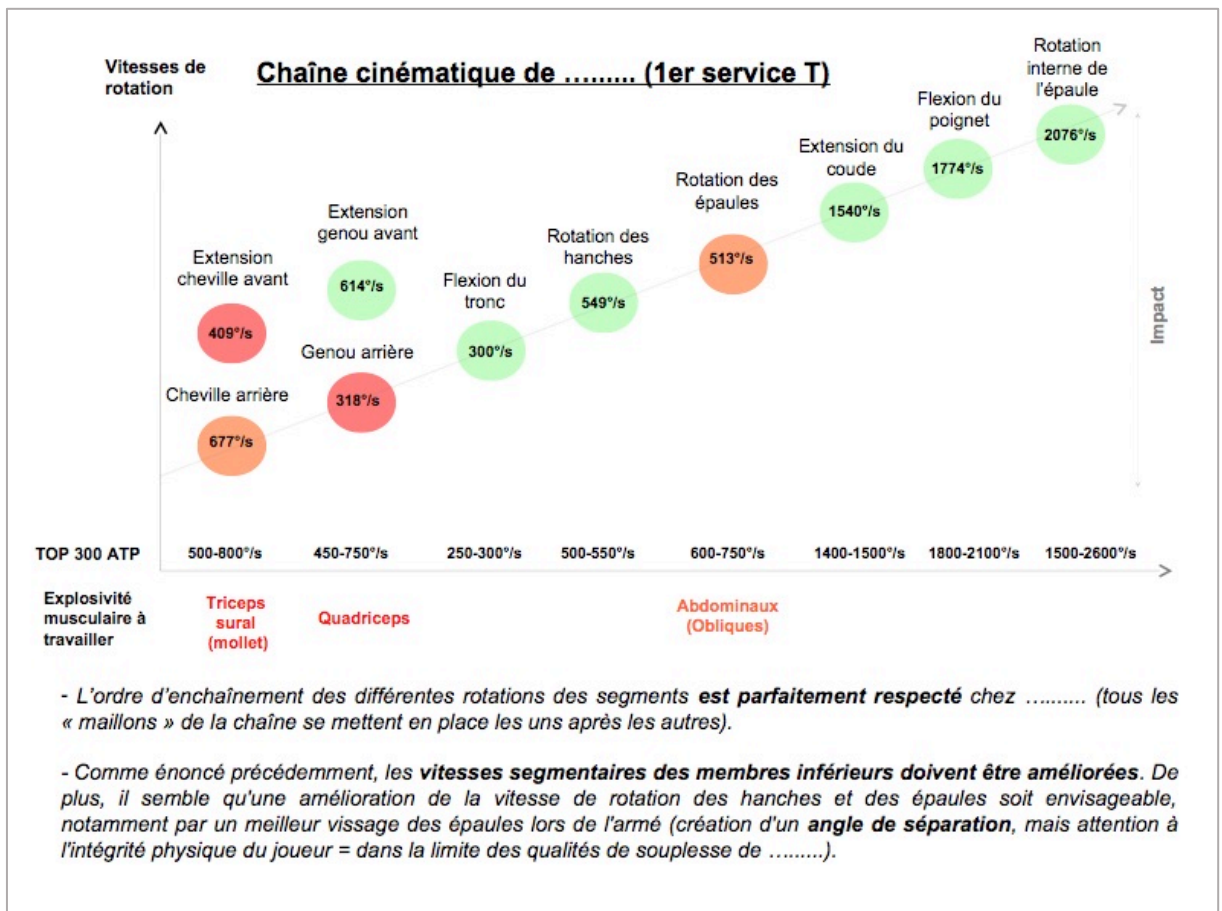
● Position précise de l'impact



Concernant la position de l'impact, nos résultats chez sont en adéquation avec les résultats d'une étude Australienne réalisée chez des joueuses professionnelles (moyenne = 150ème WTA).

En effet, la hauteur de frappe semble être un critère très stable (+/- 3,4 cm chez). De plus, la variation dans la position latérale et vers l'avant de l'impact semble elle aussi en adéquation avec ce que nous pouvons attendre d'un joueur du niveau de (même si l'impact de 3 des 11 services pris en compte semble un peu plus éloigné de la « zone préférentielle » de frappe).

Critères de performance (1 ^{ère} balle sur le T)	Etude Australienne
Ecart-type « Haut/Bas »	3,4 cm	3,5 cm
Ecart-type « Droite/Gauche »	10,5 cm	10,3 cm
Ecart-type « Avant/Arrière »	10,9 cm	11,7 cm



● **Bilan Comparaison Technique habituelle / Service avec relais d'appuis**

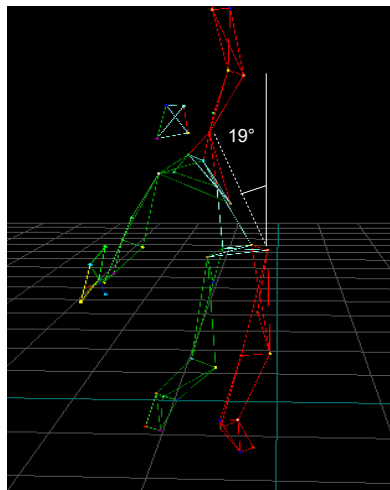
Critères de performance du service	Technique habituelle	Relais d'appuis
Vitesse moyenne de la première balle	187 km/h	187 km/h
Vitesse de la tête de raquette avant l'impact	168 km/h	175 km/h
Critères de performance du membre supérieur	Ok	Ok
- Vitesse de rotation interne de l'épaule	2076 °/s	2300 °/s
- Vitesse d'extension du poignet	1774 °/s	1620 °/s
- Vitesse d'extension du coude	1540 °/s	1620 °/s
Critères de performance du membre inférieur	A améliorer	A améliorer Supérieurs
- Vitesse verticale hanche avant	1,6 m/s	1,8 m/s
- Vitesse verticale hanche arrière	2,1 m/s	2,3 m/s
Hauteur de la frappe de balle	Ok	Ok
Contraintes articulaires au coude et à l'épaule	Ok	Supérieures

- Nos résultats montrent que le changement vers le service avec relais d'appuis peut être envisagé pour En effet, la poussée des jambes est meilleure lors du relais d'appuis, et il semble que soit capable de créer davantage de vitesse avec cette organisation (vitesses de la chaîne cinématique supérieures, vitesse de la raquette supérieure). Si cette solution est choisie, il faudra veiller à l'intégrité physique de (augmentation des contraintes articulaires du membre supérieur, et augmentation de l'inclinaison latérale du tronc, voir page suivante).

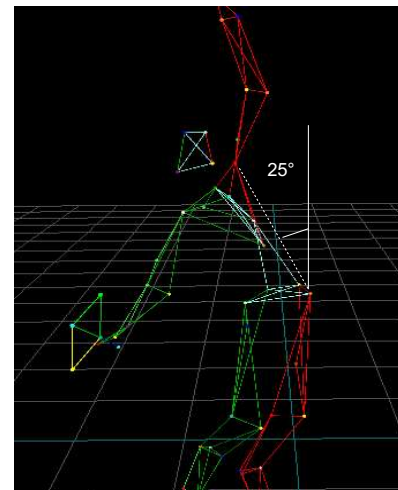
ANALYSE BIOMECHANIQUE

.....
.....
.././2016

● **Remarque : Bilan Comparaison Technique habituelle / Service avec relais d'appuis**



Inclinaison latérale du tronc après le lancer, Technique habituelle



Inclinaison latérale du tronc après le lancer, Relais d'appuis

- Lorsque utilise un relais d'appuis, nous observons une augmentation de l'inclinaison latérale du tronc à la suite du lancer de balle (4 des 5 services validés). Cette organisation serait à surveiller, car elle peut entraîner une augmentation de la sollicitation des muscles abdominaux, et notamment de l'oblique externe gauche, plus fortement étiré le cas échéant.

Annexe 2. Caractéristiques détaillées des joueurs de l'étude 1

	Age (années)	Taille (m)	Masse (kg)	Classement FFT	D / G	Technique service
Joueur 1	12,3	1,77	59	4/6	Droitier	Relais d'appuis
Joueur 2	12,6	1,73	49	5/6	Droitier	Relais d'appuis
Joueur 3	12,7	1,55	42	3/6	Droitier	Sans relais d'appuis
Joueur 4	12,8	1,69	54	3/6	Droitier	Sans relais d'appuis
Joueur 5	13,1	1,67	49	4/6	Droitier	Relais d'appuis
Joueur 6	13,2	1,66	43	4/6	Droitier	Sans relais d'appuis
Joueur 7	13,4	1,73	53	4/6	Droitier	Relais d'appuis
Joueur 8	13,7	1,65	48	4/6	Droitier	Sans relais d'appuis
Joueur 9	13,7	1,71	59	3/6	Droitier	Relais d'appuis
Joueur 10	13,8	1,77	65	4/6	Droitier	Relais d'appuis
Joueur 11	13,8	1,64	61	3/6	Droitier	Sans relais d'appuis
Joueur 12	13,8	1,72	66	3/6	Gaucher	Sans relais d'appuis
Joueur 13	13,8	1,75	55	3/6	Gaucher	Sans relais d'appuis
Joueur 14	14,0	1,64	53	2/6	Droitier	Relais d'appuis
Joueur 15	14,0	1,84	66	2/6	Droitier	Sans relais d'appuis
Joueur 16	14,1	1,76	62	15	Droitier	Sans relais d'appuis
Joueur 17	14,2	1,74	63	1/6	Droitier	Relais d'appuis
Joueur 18	14,2	1,62	54	4/6	Droitier	Relais d'appuis
Joueur 19	14,3	1,72	61	2/6	Droitier	Sans relais d'appuis
Joueur 20	14,6	1,71	65	2/6	Droitier	Relais d'appuis
Joueur 21	14,7	1,76	65	1/6	Droitier	Relais d'appuis
Joueur 22	14,8	1,90	70	2/6	Droitier	Relais d'appuis
Joueur 23	14,9	1,88	75	3/6	Droitier	Relais d'appuis
Joueur 24	15,1	1,73	63	3/6	Droitier	Sans relais d'appuis
Joueur 25	15,8	1,86	65	0	Gaucher	Sans relais d'appuis
Joueur 26	15,9	1,83	69	0	Droitier	Relais d'appuis
Joueur 27	16,0	1,75	66	-4/6	Droitier	Relais d'appuis
Joueur 28	16,7	1,94	82	-4/6	Droitier	Relais d'appuis
Joueur 29	18,5	1,85	78	N°65	Gaucher	Relais d'appuis
Joueur 30	20,0	1,91	78	N°15	Droitier	Sans relais d'appuis
Joueur 31	20,5	1,84	68	N°25	Droitier	Relais d'appuis
Joueur 32	20,7	1,86	78	N°79	Droitier	Relais d'appuis
Joueur 33	21,8	1,98	81	N°8	Droitier	Relais d'appuis
Joueur 34	22,8	1,82	68	N°18	Droitier	Relais d'appuis
Joueur 35	23,5	1,85	76	N°33	Droitier	Sans relais d'appuis
Joueur 36	24,0	1,90	83	N°13	Droitier	Sans relais d'appuis
Joueur 37	26,1	1,76	65	N°26	Gaucher	Relais d'appuis

Annexe 3. Caractéristiques détaillées des joueuses de l'étude 1

	Age (années)	Taille (m)	Masse (kg)	Classement FFT	D / G	Technique service
Joueuse 1	12,4	1,65	51	2/6	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 2	13,1	1,66	47	2/6	Droitière	Sans relais d'appuis
Joueuse 3	13,2	1,65	57	2/6	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 4	13,3	1,68	47	5/6	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 5	13,3	1,65	48	0	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 6	13,7	1,54	43	5/6	Droitière	Sans relais d'appuis
Joueuse 7	13,9	1,67	55	1/6	Droitière	Sans relais d'appuis
Joueuse 8	14,1	1,69	53	3/6	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 9	14,1	1,76	64	0	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 10	14,3	1,70	59	1/6	Gauchère	Relais d'appuis
Joueuse 11	14,7	1,70	55	-4/6	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 12	14,7	1,77	68	-2/6	Droitière	Sans relais d'appuis
Joueuse 13	14,8	1,73	59	-4/6	Droitière	Sans relais d'appuis
Joueuse 14	14,8	1,58	49	0	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 15	14,8	1,49	55	2/6	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 16	14,8	1,68	55	5/6	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 17	14,9	1,72	55	-2/6	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 18	15,1	1,85	65	-2/6	Gauchère	Relais d'appuis
Joueuse 19	15,2	1,71	54	0	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 20	15,3	1,71	59	-4/6	Droitière	Sans relais d'appuis
Joueuse 21	15,3	1,73	66	3/6	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 22	15,5	1,60	57	4/6	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 23	15,5	1,68	60	-15	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 24	15,7	1,70	57	N°55	Droitière	Sans relais d'appuis
Joueuse 25	15,8	1,65	50	1/6	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 26	16	1,65	60	-15	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 27	16,3	1,72	60	1/6	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 28	16,5	1,71	59	N°39	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 29	16,8	1,77	62	N°54	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 30	17,0	1,65	52	N°55	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 31	17,0	1,74	59	-2/6	Droitière	Sans relais d'appuis
Joueuse 32	19,3	1,66	57	-4/6	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 33	19,4	1,74	64	0	Droitière	Sans relais d'appuis
Joueuse 34	20,0	1,66	57	N°16	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 35	21,7	1,76	63	N°13	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 36	21,7	1,72	61	N°5	Droitière	Relais d'appuis
Joueuse 37	26,8	1,74	65	N°7	Droitière	Relais d'appuis

Annexe 4. Méthodologie de l'EMG

1) Placement et orientation des électrodes

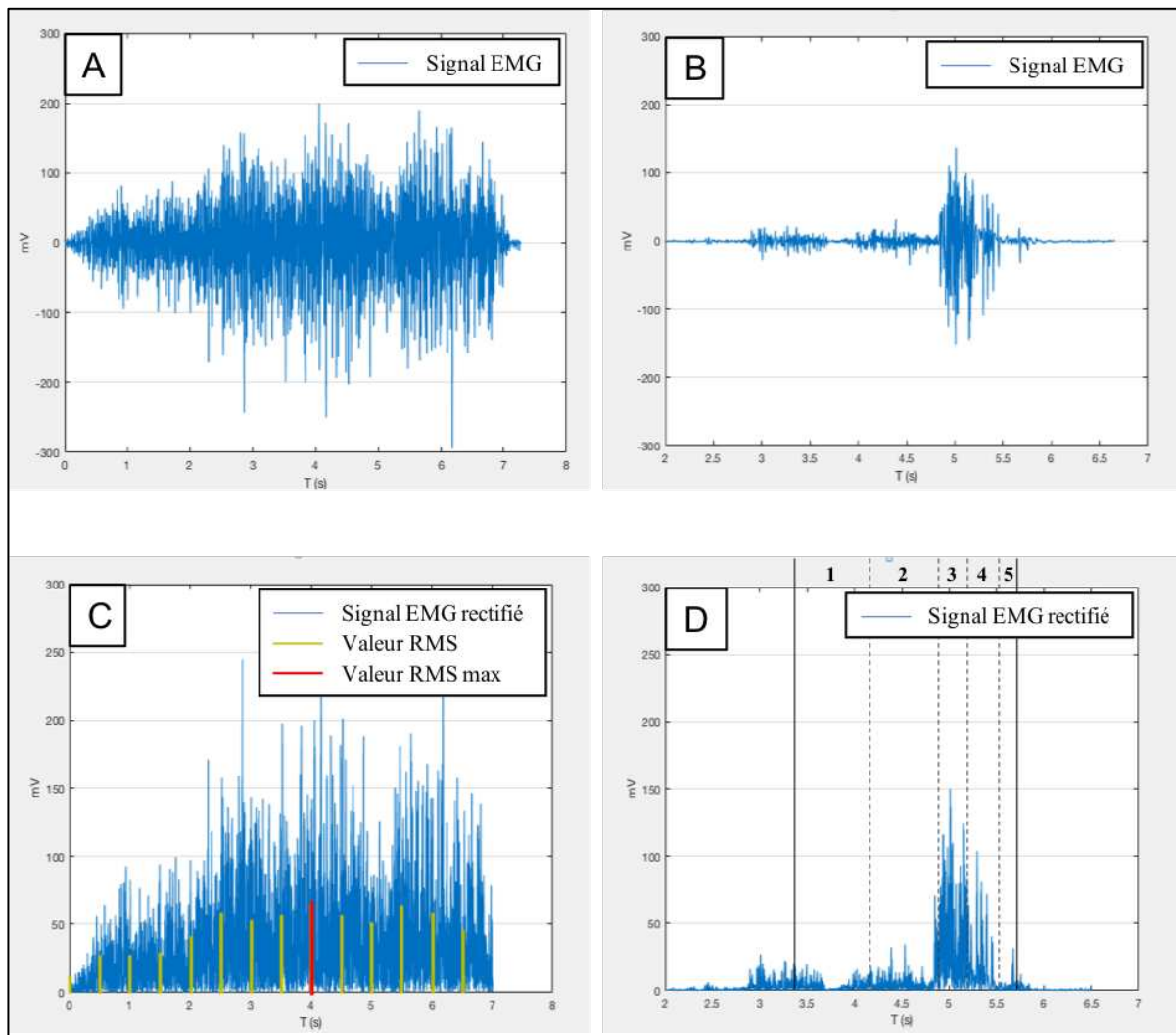
	Position et orientation des électrodes
Muscles	
Biceps brachial	<i>Position</i> : à un tiers d'une ligne qui va de la fosse du cubitus au bord médial de l'acromion. <i>Orientation</i> : sur cette ligne
Deltoïde antérieur	<i>Position</i> : à un doigt distalement et en avant de l'acromion. <i>Orientation</i> : sur la ligne directrice entre l'acromion et le pouce
Grand droit (D et ND)	<i>Position</i> : à 3 cm de part et d'autre du nombril. <i>Orientation</i> : sur une ligne verticale
Érecteur du rachis (D et ND)	<i>Position</i> : à deux doigts du processus épineux de L1. <i>Orientation</i> : sur une ligne verticale
Grand dentelé	<i>Position</i> : à l'intersection d'une ligne horizontale qui part de l'angle inférieur de la scapula et de la « midaxillary line ». <i>Orientation</i> : sur une ligne qui relie le nombril à l'épine de la scapula
Grand dorsal	<i>Position</i> : sur une ligne qui passe à 4 cm sous l'angle inférieur de la scapula et à mi-distance entre la colonne vertébrale et le bord latéral du tronc. <i>Orientation</i> : en biais sur une ligne qui relie l'aisselle aux vertèbres lombaires
Grand pectoral	<i>Position</i> : à un tiers sur une ligne reliant le processus coracoïde de la scapula et le processus xyphoïde du sternum. <i>Orientation</i> : sur une ligne horizontale
Oblique externe (D et ND)	<i>Position</i> : à 15 cm de part et d'autre du nombril. <i>Orientation</i> : sur une ligne qui relie l'épine iliaque antéro-supérieure et le pubis
Oblique interne (D et ND)	<i>Position</i> : à 2 cm au-dessus et vers l'intérieur de l'épine iliaque antéro-supérieure. <i>Orientation</i> : en diagonale
Sous-épineux	<i>Position</i> : à mi-chemin entre les bords médial et latéral de la scapula et à mi-chemin entre l'épine et l'angle inférieur de la scapula. <i>Orientation</i> : sur une ligne horizontale
Trapèze moyen	<i>Position</i> : à mi-chemin d'une ligne horizontale qui relie le bord médial de la scapula à T3. <i>Orientation</i> : entre T5 et l'acromion
Triceps brachial	<i>Position</i> : à deux doigts sous une ligne à mi-chemin entre la fosse postérieure de l'acromion et l'olécrâne. <i>Orientation</i> : sur cette ligne

Annexe 4.A – Placement et orientation des électrodes de surface en fonction des recommandations de la littérature. D : côté dominant, ND : côté non-dominant.



Annexe 4.B – Avant de placer les électrodes, la surface de la peau a été nettoyée avec de l'alcool et du coton. Lorsque cela était nécessaire, la peau a été rasée. Afin de ne pas occasionner de perturbations lors de l'enregistrement des mouvements de service, les boîtiers EMG étaient collés sur la peau à l'aide d'une bande adhésive élastique.

2) Traitement des signaux



Annexe 4.C – Représentation des signaux EMG bruts obtenus pour le deltoïde antérieur lors de la contraction maximale volontaire isométrique (CMVI) (Figure A) et lors du mouvement du service (Figure B), et représentation des signaux EMG traités pour la CMVI avec le calcul des valeurs RMS (Figure C) et des signaux EMG traités pour le mouvement du service avec représentation des différentes phases du service (Figure D). 1 : phase de préparation, 2 : phase d’armé, 3 : phase d’accélération, 4 : phase de décélération, 5 : phase d’accompagnement.

Annexe 5. Résultats préliminaires pour l'EMG

	Garçons de 12 à 16 ans (n = 27)			
	Préparation (% CMVI)	Armé (% CMVI)	Accélération (% CMVI)	Décélération et Accompagnement (% CMVI)
Muscle de membre supérieur				
Biceps brachial	3 ± 2	17 ± 6	16 ± 9	21 ± 14
Deltoïde antérieur	11 ± 5	40 ± 15	40 ± 28	45 ± 22
Grand dentelé	10 ± 7	40 ± 23	62 ± 26	43 ± 28
Grand dorsal	5 ± 3	6 ± 7	63 ± 31	26 ± 13
Grand pectoral	3 ± 1	23 ± 8	49 ± 24	14 ± 11
Sous-épineux	7 ± 3	26 ± 11	33 ± 23	43 ± 17
Trapèze moyen	8 ± 6	30 ± 12	32 ± 18	44 ± 18
Triceps brachial	3 ± 2	8 ± 2	71 ± 30	25 ± 12
Muscle du tronc				
Érecteur du rachis D	21 ± 7	7 ± 5	35 ± 19	62 ± 15
Érecteur du rachis ND	11 ± 8	38 ± 22	57 ± 25	56 ± 28
Grand droit D	3 ± 2	20 ± 8	84 ± 25	19 ± 10
Grand droit ND	2 ± 1	30 ± 12	83 ± 35	14 ± 9
Oblique externe D	4 ± 2	15 ± 12	46 ± 23	25 ± 11
Oblique externe ND	4 ± 1	37 ± 15	43 ± 21	16 ± 9
Oblique interne D	7 ± 5	27 ± 16	65 ± 38	52 ± 29
Oblique interne ND	7 ± 6	70 ± 29	116 ± 68	45 ± 32

Annexe 5.A – Activation moyenne (\pm écart-type) des muscles du membre supérieur et du tronc au cours des différentes phases du 1^{er} service à plat chez les garçons. En gras : phase du service pour laquelle le muscle est le plus fortement activé. CMVI : contraction maximale volontaire isométrique, D : côté dominant, ND : côté non-dominant.

**Filles de 12 à 16 ans
(n = 25)**

	Préparation (% CMVI)	Armé (% CMVI)	Accélération (% CMVI)	Décélération et Accompagnement (% CMVI)
Muscle de membre supérieur				
Biceps brachial	3 ± 2	13 ± 7	19 ± 16	17 ± 9
Deltoïde antérieur	10 ± 6	27 ± 11	41 ± 29	36 ± 15
Grand dentelé	7 ± 4	24 ± 13	72 ± 43	34 ± 14
Grand dorsal	6 ± 5	11 ± 8	55 ± 30	21 ± 10
Grand pectoral	4 ± 2	18 ± 9	47 ± 25	18 ± 14
Sous-épineux	10 ± 6	25 ± 10	37 ± 16	35 ± 20
Trapèze moyen	9 ± 9	24 ± 15	32 ± 14	36 ± 14
Triceps brachial	3 ± 2	8 ± 3	59 ± 23	17 ± 7
Muscle du tronc				
Érecteur du rachis D	14 ± 7	9 ± 6	46 ± 33	47 ± 17
Érecteur du rachis ND	9 ± 5	27 ± 11	60 ± 34	44 ± 22
Grand droit D	3 ± 1	13 ± 8	55 ± 23	11 ± 8
Grand droit ND	2 ± 1	21 ± 10	58 ± 35	14 ± 12
Oblique externe D	5 ± 3	14 ± 12	50 ± 19	22 ± 9
Oblique externe ND	3 ± 2	28 ± 11	38 ± 14	15 ± 13
Oblique interne D	7 ± 4	25 ± 12	72 ± 40	48 ± 32
Oblique interne ND	7 ± 4	49 ± 18	84 ± 42	30 ± 18

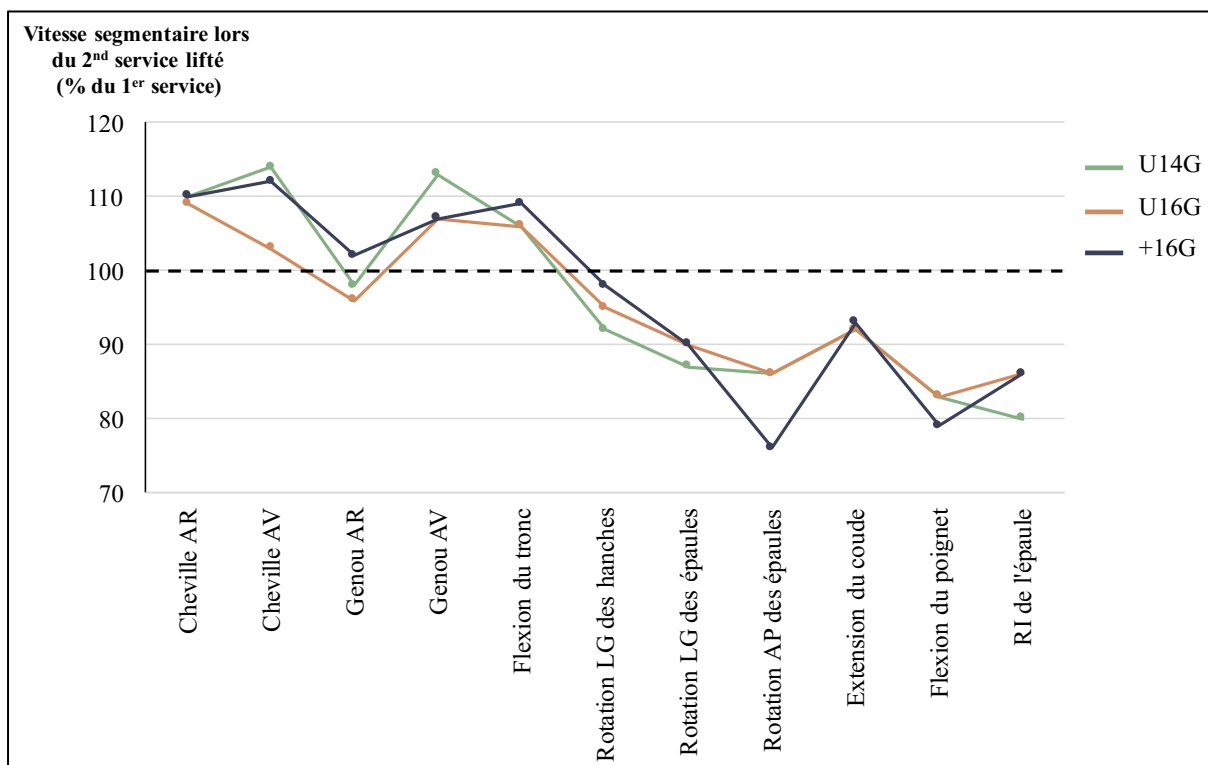
Annexe 5.B – Activation musculaire moyenne (\pm écart-type) pour les muscles du membre supérieur et du tronc au cours des différentes phases du 1^{er} service à plat chez les filles. En gras : phase du service pour laquelle le muscle est le plus fortement activé. CMVI : contraction maximale volontaire isométrique, D : côté dominant, ND : côté non-dominant.

Annexe 6. Résultats préliminaires pour la 2nd balle de service

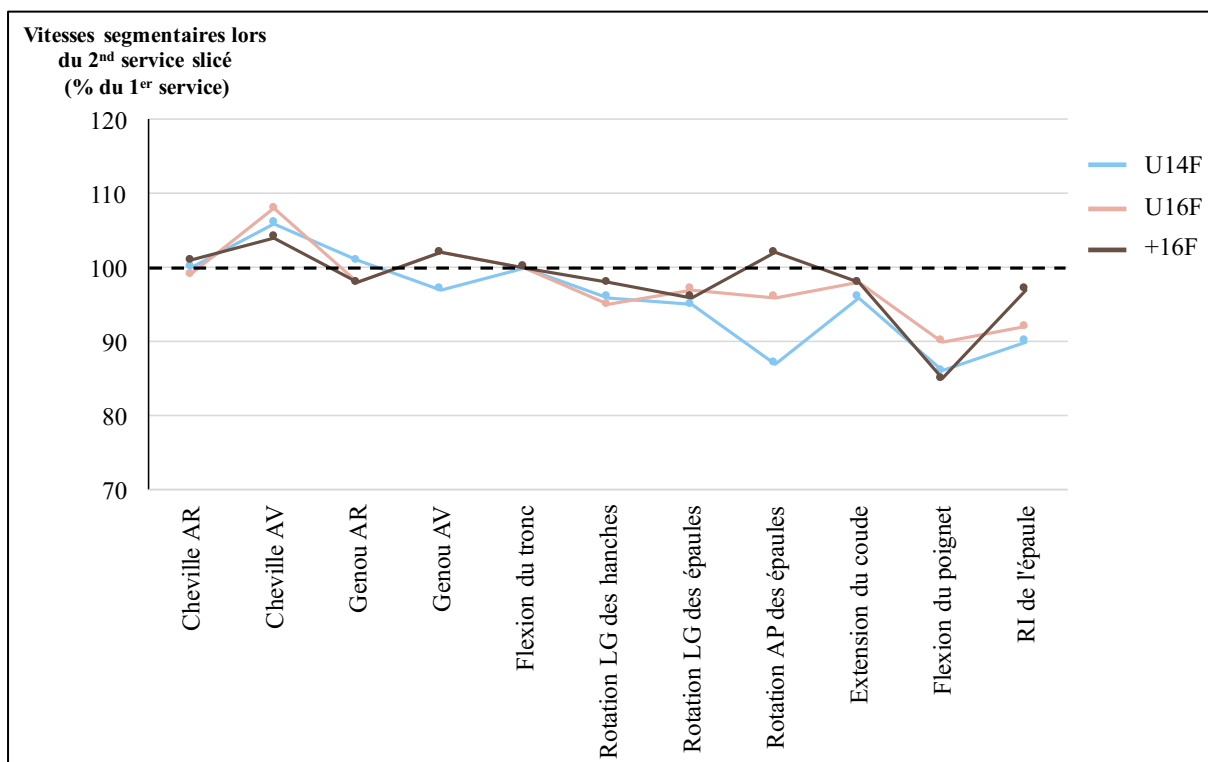
1) Analyse cinématique

	2 nd service lifté			2 nd service slicé		
	U14G (n = 15)	U16G (n = 12)	+16G (n = 10)	U14F (n = 7)	U16F (n = 17)	+16F (n = 12)
Début de la poussée						
Angle des hanches (°)	104 ±15 (96)	103 ±17 (93)	104 ±17 (91)	84 ±14 (85)	102 ±20 (99)	96 ±19 (94)
Vitesse verticale maximale						
Hanche AR (m·s ⁻¹)	2,15 ±0,22 (2,02)	2,35 ±0,27 (2,24)	2,32 ±0,28 (2,16)	1,94 ±0,19 (1,97)	2,19 ±0,26 (2,20)	2,10 ±0,32 (2,15)
Hanches AV (m·s ⁻¹)	1,44 ±0,25 (1,31)	1,65 ±0,21 (1,53)	1,76 ±0,23 (1,60)	1,35 ±0,16 (1,35)	1,48 ±0,29 (1,43)	1,64 ±0,32 (1,55)
Angle maximal durant l'armé						
Angle de séparation (°)	26 ±13 (29)	25 ±14 (32)	19 ±13 (25)	35 ±13 (37)	28 ±11 (30)	21 ±10 (22)
Extension du tronc (°)	11 ±6 (14)	9 ±6 (12)	13 ±9 (15)	9 ±8 (10)	12 ±5 (14)	16 ±6 (16)
Inclinaison latérale du tronc (°)	39 ±8 (39)	36 ±9 (33)	38 ±10 (34)	30 ±11 (30)	35 ±9 (35)	34 ±7 (34)
Flexion du coude (°)	52 ±10 (55)	54 ±14 (57)	48 ±6 (55)	53 ±10 (53)	49 ±11 (52)	49 ±12 (52)
ADDHOR de l'épaule (°)	26 ±8 (25)	23 ±8 (21)	14 ±8 (19)	23 ±10 (22)	23 ±12 (24)	25 ±9 (24)
Angle de la raquette (°)	43 ±24 (24)	49 ±25 (38)	62 ±28 (45)	74 ±30 (55)	53 ±25 (38)	51 ±21 (45)
Impact de balle						
Inclinaison latérale du tronc (°)	67 ±8 (56)	65 ±7 (53)	61 ±7 (49)	49 ±16 (47)	47 ±6 (46)	48 ±6 (46)
ABD de l'épaule (°)	115 ±10 (113)	115 ±8 (114)	120 ±11 (117)	105 ±5 (109)	115 ±12 (113)	112 ±9 (113)
Position en X (m)	-0,36 ±0,18 (-0,16)	-0,45 ±0,16 (-0,17)	-0,40 ±0,28 (-0,16)	0,01 ±0,16 (-0,08)	0,00 ±0,14 (-0,07)	0,00 ±0,13 (-0,04)
Position en Y (m)	0,36 ±0,21 (0,57)	0,38 ±0,11 (0,62)	0,33 ±0,17 (0,66)	0,45 ±0,21 (0,49)	0,52 ±0,14 (0,57)	0,46 ±0,12 (0,54)
Position en Z (m)	2,52 ±0,12 (2,52)	2,61 ±0,12 (2,62)	2,75 ±0,15 (2,76)	2,38 ±0,06 (2,38)	2,48 ±0,11 (2,47)	2,55 ±0,09 (2,54)
Vitesse de balle (km·h ⁻¹)	118 ±10 (156)	132 ±8 (168)	141 ±17 (185)	119 ±7 (143)	126 ±8 (151)	135 ±10 (168)
Vitesse maximale de la raquette (km·h ⁻¹)	131 ±10 (91,8 %)	145 ±8 (93,6 %)	159 ±9 (94,2 %)	123 ±8 (95,1 %)	132 ±7 (95,5 %)	139 ±8 (97,5 %)

Annexe 6.A – Variables cinématiques mesurées lors du 2nd service lifté chez les joueurs et lors du 2nd service slicé chez les joueuses. Entre parenthèses : variables cinématiques mesurées sur le 1^{er} service à plat ; en gras : principales différences retrouvées par groupe entre les deux modalités de service ; en rouge : principales différences retrouvées pour le 2nd service en fonction des catégories d'âge. AR : arrière, AV : avant, ADDHOR : adduction horizontale, ABD : abduction.

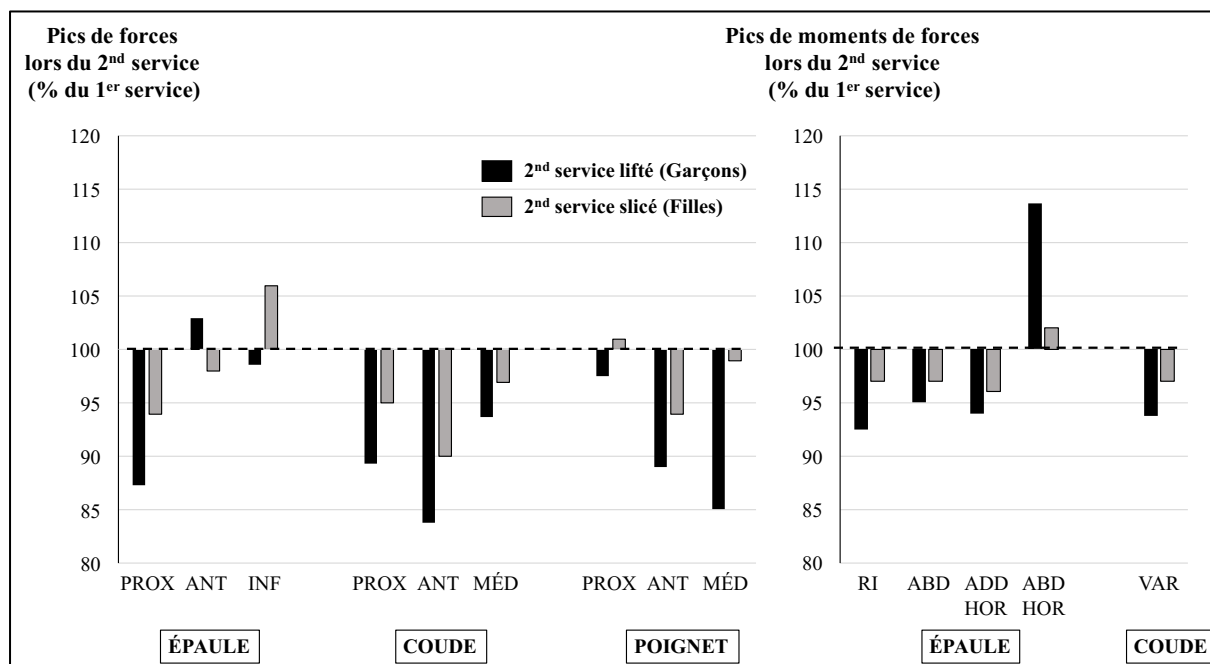


Annexe 6.B – Vitesses segmentaires maximales mesurées lors du 2nd service lifté chez les joueurs par rapport à celles mesurées sur la 1^{ère} balle à plat. AR : arrière, AV : avant, LG : longitudinale, AP : antéropostérieure, RI : rotation interne.



Annexe 6.C – Vitesses segmentaires maximales mesurées lors du 2nd service slicé chez les joueuses par rapport à celles mesurées sur la 1^{ère} balle à plat. AR : arrière, AV : avant, LG : longitudinale, AP : antéropostérieure, RI : rotation interne.

2) Analyse dynamique



Annexe 6.D – Contraintes articulaires maximales du membre supérieur dominant lors du 2nd service lifté chez les joueurs (n = 37) et du 2nd service slicé chez les joueuses par rapport à celles mesurées sur la 1^{ère} balle à plat. PROX : proximale, ANT : antérieure, INF : inférieure, MÉD : médiale, RI : rotation interne, ABD : abduction, ADD HOR : adduction horizontale, ABD HOR : abduction horizontale, VAR : varus.

Titre : L'évolution biomécanique du service des jeunes joueurs de tennis élités : identification des facteurs de performance et de risque de blessures.

Mots clés : biomécanique, tennis, service, formation des jeunes joueurs élités, performance, blessures.

Résumé : Pour les joueurs de tennis professionnels, le service est considéré comme le coup le plus important pour gagner un match. De plus, il est décrit comme un coup traumatisant qui occasionne de nombreuses blessures chroniques du membre supérieur et du tronc. Dans une logique de formation vers le haut niveau, les jeunes joueurs doivent alors acquérir le plus tôt possible une technique de service efficace pour produire une vitesse de balle élevée tout en limitant le risque de blessures. La réalisation de ces deux objectifs représente une réelle problématique au regard de la complexité gestuelle du service et des erreurs techniques qui en découlent. Dans ce cadre, cette thèse ambitionne de répondre aux questions suivantes : comment évolue la technique de service des joueurs élités entre 12 ans et l'âge adulte ? Quels sont les critères de performance et les facteurs de risques de blessures au service chez les jeunes joueurs ? À partir de captures de mouvement en 3D, la première étude explore l'influence de l'âge et du sexe sur les variables cinématiques et dynamiques du membre supérieur dominant au cours du service. Les études 2 et 3 s'intéressent respectivement au type d'appuis et à la trajectoire de la raquette en « plateau » pour comprendre leur effet sur la performance et le risque de blessures au service. L'ensemble de ce travail fournit aux entraîneurs des recommandations concrètes sur le service pour faciliter la détection des meilleurs espoirs, individualiser les contenus d'entraînement en fonction de l'âge et du sexe, et améliorer la formation technique des jeunes joueurs pour augmenter la vitesse de balle et diminuer le risque de blessures chroniques.

Title: Biomechanical evolution of serve in young elite tennis players: identification of performance and injury risk factors.

Keywords: Biomechanics, tennis, serve, young elite training, performance, injuries

Abstract: For professional tennis players, serve is considered as the most important stroke to win a single game. Moreover, it is described as a traumatic stroke resulting in the onset of many upper limb and trunk chronic injuries. Thus, in a high-level training approach, young elite players have to early develop efficient serve technique to produce high ball velocity while avoiding injury risks. Achieving this dual goal yet represents a real challenge considering the complexity of the movement and technical errors that could result from. Specifically, the thesis aims to answer the following questions: how serve technique evolves between 12 years old and adults? And what are both performance and injury risk factors for young elite serve? From motion captures in 74 male and female nationally ranked players, the first study investigates the influence of age and sex on kinematics and upper limb kinetics during serve. The second and third studies focus respectively on the type of stances and the “waiter” racket trajectory to understand their effect on performance and injury risks. These works provide practical information and specific recommendations about serve for tennis coaches in order to facilitate young talent detection, to individualize more efficiently training content regarding age and sex and to improve young elite serve technique to increase ball velocity and to reduce chronic injury risks.