COLLEGE DOCTORAL BRETAGNE
EDUCATION, LANGAGES INTERACTIONS, COGNITION CLINIQUE, EXPERTISE

UNIVERSITÉ RENNES 2

THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE RENNES 2

ECOLE DOCTORALE N° 646
Education, Langages, Interactions, Cognition, Clinique, Expertise
Spécialité : *STAPS*

Par
Kaies DEGHAIES

Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique

Thèse présentée et soutenue à l'Université Rennes 2, le 30 mars 2026
Unité de recherche : Laboratoire Mouvement Sport Santé – M2S

Rapporteurs avant soutenance :

Frédérique HINTZY	Professeure des Universités, Université Savoie Mont Blanc
Philippe ROUCH	Professeur des Universités, Arts et Métiers Sciences et Technologies

Composition du Jury :

Membres du jury :	Delphine CHADEFAUX	Maîtresse de Conférence, Université Sorbonne Paris Nord
	Frédérique HINTZY	Professeure des Universités, Université Savoie Mont Blanc
	Philippe ROUCH	Professeur des Universités, Arts et Métiers Sciences et Technologies
Dir. de thèse :	Benoît BIDEAU	Professeur des Universités, Université Rennes 2
Co-dir. de thèse :	Caroline MARTIN	Maîtresse de Conférence, Université Rennes 2
	Thibault LUSSIANA	Docteur, Volodalen

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Frédérique Hintzy et Philippe Rouch d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Je remercie également Delphine Chadefaux d'avoir accepté de participer en tant que membre du jury à l'évaluation de ce travail.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse, Benoît Bideau, pour avoir accepté d'encadrer ce projet, ainsi que pour ses conseils et son accompagnement tout au long de ce parcours, qui ont été essentiels à la réalisation de ce travail.

Je souhaite également exprimer mes plus sincères remerciements à ma co-directrice de thèse, Caroline Martin. Merci pour la confiance accordée, les conseils précieux, les moments de partage, d'échanges et de réflexion, et surtout pour ta disponibilité et ton soutien constant, qui m'ont permis de traverser les périodes les plus difficiles. Cette thèse porte indéniablement l'empreinte de ton accompagnement.

Cette thèse n'aurait pu aboutir sans Pierre Touzard et Loïc Fourel, véritables piliers de ce travail. Merci pour votre disponibilité, votre écoute et votre présence lors des expérimentations. Merci pour vos contributions aux réflexions, aux doutes et parfois aux remises en question, qui ont largement nourri ce travail et guidé sa construction scientifique.

Je souhaite remercier la société Volodalen, et tout particulièrement Thibault Lussiana et Cyrille Gindre, sans qui ce projet n'aurait jamais pu voir le jour. Même si mes passages dans l'entreprise ont été brefs, ils m'ont permis d'apprendre énormément et de découvrir de nouvelles perspectives scientifiques. Merci pour les échanges passionnants, la confiance accordée et l'accueil bienveillant dans un univers professionnel totalement nouveau pour moi. Je garde un excellent souvenir des moments passés en Suisse et reste reconnaissant pour tout ce que cette expérience m'a apporté.

Je souhaite également remercier les structures qui m'ont accompagné tout au long de cette thèse. Merci au laboratoire M2S et à toute l'équipe administrative, dont la disponibilité a rendu les aspects logistiques et pratiques de la thèse beaucoup plus faciles à gérer. Je remercie également l'EUR DIGISPORT et l'Université Rennes 2 pour le financement et pour avoir contribué à créer un environnement doctoral stimulant.

Je tiens également à remercier Brigitte Gelein pour son aide précieuse en statistiques et en méthodes de clustering. Merci pour ta disponibilité, les conseils clairs, les nombreuses

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

réunions et pour avoir toujours répondu à nos questions avec patience et bienveillance.

À tous mes collègues doctorants, un immense merci pour votre énergie, votre bonne humeur et, surtout, votre présence au quotidien. J'ai pris un immense plaisir à travailler dans le même bureau, à partager des moments et à écouter vos anecdotes. Merci pour tous ces instants partagés : pauses café improvisées, gâteaux du lundi, activités sportives. Sans vous, cette thèse aurait été bien plus difficile.

Un immense merci à mon ancien club de tennis, l'AT Betton, pour tout le soutien pendant ma thèse. Merci de m'avoir offert ces moments incroyables de convivialité... et de tennis ! Pierre, Yann, Briac, Carole... vous êtes vraiment formidables ! Je suis désolé de ne pas avoir toujours pu montrer tout mon potentiel sur le terrain lors des rencontres par équipe (merci les blessures !), mais chaque match et chaque entraînement avec vous m'ont laissé des souvenirs mémorables.

Aujourd'hui, alors que je commence un nouveau chapitre au PUC Tennis, je tiens particulièrement à remercier Yann Lemeur, qui m'a accueilli à bras ouverts et m'a fait confiance dès le premier jour. Travailler avec des personnes aussi passionnées et bienveillantes, ça fait vraiment plaisir. Merci à toi et à toute l'équipe pour votre confiance, votre soutien et l'intérêt que vous avez porté à ma thèse. Vous êtes les premiers à appliquer concrètement ses résultats... et j'espère que ça portera ses fruits, en complément de votre travail déjà magnifique.

Je finirai naturellement ces remerciements par l'ensemble de ma famille. À mes parents, merci de m'avoir permis de réaliser ce parcours que je souhaitais depuis longtemps et d'avoir respecté mes choix. Merci pour vos sacrifices, pour m'avoir cru quand moi-même je doutais, et pour m'avoir soutenu malgré les milliers de kilomètres qui nous séparaient. Je ne serais pas arrivé là sans vous. Vous m'avez toujours donné la force de continuer. Je vous aime profondément.

À mon frère Sadok et à mes sœurs Salma et Ilhem, même à distance, votre soutien m'a toujours touché et porté plus que jamais. Merci d'avoir cru en moi et respecté mon choix de vivre cette expérience. Merci pour les moments de complicité et vos encouragements. Vous êtes une partie essentielle de mon parcours, et j'éprouve une profonde fierté de vous avoir dans ma vie.

Enfin, à Ines, ma compagne, ma fiancée, mon amour... Tu as été là à chaque étape de ce chemin, tu as cru en moi chaque jour et tu m'as apporté un soutien sans faille. Ton soutien dans les moments difficiles m'a porté plus que tu ne le crois. Merci d'avoir été présente dans mes doutes et de m'avoir soutenu quand j'en avais besoin. Merci d'avoir

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

supporté mes nuits blanches, mes week-ends enfermés à travailler et toutes nos longues discussions sans fin sur la thèse. Je ne sais pas comment j'aurais fait sans toi. Je t'aime profondément. Maintenant, continuons notre chemin ensemble... il y a encore tant de belles choses à vivre et à construire devant nous !

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

CONTEXTE DE LA THÈSE

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'un dispositif CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche) établi entre l'Université Rennes 2 et la société Volodalen. Le doctorant a bénéficié d'un financement salarial versé par l'entreprise, avec le soutien de l'Agence Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT).

Elle a contribué au Projet Prioritaire de Recherche « Sport de Très Haute Performance » BEST-Tennis qui avait pour but de préparer et d'améliorer la performance des joueurs de tennis valides et en fauteuil au service et au retour de service pour remporter un maximum de médailles aux JOP de Paris de 2024. Afin de fournir aux entraîneurs et aux joueurs des connaissances et des outils exploitables sur le terrain pour améliorer au quotidien l'entraînement et la préparation aux JOP 2024, un consortium a été constitué : il se composait de la Fédération Française de Tennis (FFT), de deux universités (Université Rennes 2, Université Sorbonne Paris Nord), du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), de l'Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE-Supaero), de l'Institution Nationale des Invalides – Centre d'Études et de Recherche sur l'Appareillage des handicapés (INI – CERAH), du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA), du CREPS de Toulouse, de l'École Nationale des Sports de Montagne et d'entreprises (Tennis Stat, Volodalen et Trinoma). Pour répondre aux besoins des joueurs et des entraîneurs de la FFT, plusieurs axes d'optimisation de la performance avaient été ciblés :

— le 1er axe avait pour but d'optimiser individuellement la performance au service et de réduire les risques de blessures grâce à l'analyse biomécanique du geste et à l'évaluation des préférences naturelles des athlètes

— le 2e axe visait à améliorer la performance au retour de service des athlètes à l'aide d'un entraînement perceptif utilisant les biofeedbacks et la réalité augmentée

— le 3e axe était consacré à l'analyse des stratégies mises en place au service et au retour de service par les joueurs de la FFT et la concurrence au service et au retour de service grâce à la création d'un outil automatisé d'extraction des données spatio-temporelles à partir de vidéos de matchs en compétitions.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Ce travail de thèse était directement en lien avec l'axe 1 du projet et émanait d'une demande forte émise par les entraîneurs de la FFT concernant l'accompagnement des joueurs de haut niveau quant à l'individualisation et l'optimisation du geste du service. Les entraîneurs de la FFT souhaitaient s'affranchir du schéma traditionnel visant à appliquer un seul et unique modèle de service considéré comme idéal pour tous les joueurs. A partir de la fin des années 2010, plusieurs entraîneurs au sein de la direction technique nationale de la FFT se sont intéressés et formés à l'approche clinique et scientifique de la société Volodalen, dont la stratégie est d'adapter la technique de mouvement aux caractéristiques de chaque athlète (Fédération Française de Tennis, 2021 ; Gindre et al., 2016).

L'objectif de cette thèse était d'apporter un éclairage scientifique aux principales questions de terrain formulées par les entraîneurs :

— comment mieux individualiser la biomécanique du service de chaque athlète pour optimiser la performance ?

— à quels niveaux se situe la variabilité inter-individuelle entre les joueurs de haut niveau au cours du mouvement de service ?

— peut-on identifier scientifiquement plusieurs stratégies motrices au service permettant d'atteindre une performance identique ?

— la latéralité oculo-manuelle influence-t-elle la performance et la biomécanique du service ?

— est-ce qu'il est possible de repérer des profils de joueurs dits « terriens » ou « aériens » ou encore « associés » ou « dissociés » dans leur façon de servir ? Ces profils exercent-ils une influence sur la performance au service ?

Malgré l'arrêt prématuré du projet BEST-Tennis, les travaux et l'accompagnement scientifique concernant l'axe 1 du projet en lien avec cette thèse se sont poursuivis grâce à la collaboration entre la FFT, le laboratoire M2S de l'Université Rennes 2 et la société Volodalen.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

TABLE DES MATIÈRES

1 Introduction **1**

2 Revue de littérature **3**

2.1 Le service au tennis : une arme et un défi technique 3

2.1.1 Rôle du service dans la performance des joueurs de tennis professionnels 3

2.1.2 Complexité biomécanique et exigences physiques du service 4

2.2 Évaluation de la performance au service 5

2.2.1 Indicateurs de performance 5

2.3 Analyse cinématique de la 1re balle de service : déterminants biomécaniques consensuels de la performance 9

2.3.1 Considérations méthodologiques 9

2.3.2 Les phases et les moments clés du service 10

2.3.3 Enchaînement segmentaire proximo-distal et vitesses linéaires et angulaires 12

2.3.4 Actions et rôles des membres inférieurs dans la performance au service 14

2.3.5 Rôles du tronc dans la performance au service 19

2.3.6 Contribution des articulations et des segments du membre supérieur dominant à la performance au service 22

2.4 Analyse cinématique du service : paramètres biomécaniques à forte variabilité et relations incertaines avec la performance 23

2.4.1 Action de flexion des genoux 23

2.4.2 Rôle différencié des jambes 25

2.4.3 Trajectoire du centre de masse (CoM) 25

2.4.4 Rotation du tronc autour de l'axe longitudinal 26

2.4.5 Angle de séparation 28

2.5 Influence des caractéristiques individuelles sur la performance et la biomécanique du service 30

2.5.1 Influence des paramètres anthropométriques 30

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

2.5.2 Influence des qualités physiques 32
2.5.3 Influence de la latéralité 35
2.5.4 Influence du sexe 38
2.6 Théories du contrôle et de l'apprentissage moteur : prescription versus émergence 40
2.6.1 Théories cognitivistes : le mouvement comme produit de programmes internes 40
2.6.2 Théories dynamiques : le mouvement comme propriété émergente . 44
2.6.3 La variabilité : avantage ou inconvénient ? 48
2.7 Identification des stratégies motrices menant à une même performance . . . 57
2.7.1 Concept d'équifinalité 57
2.7.2 Méthodes de clustering 58
2.7.3 Qu'en est-il au tennis ? 59
2.8 Comment les entraîneurs de tennis analysent-ils et enseignent-ils la technique de service ? 60
2.8.1 Des propositions de « modèle » de service issues de la littérature scientifique 60
2.8.2 La persistance du modèle « idéal » de service à copier 64
2.8.3 Vers une nouvelle approche de la motricité et de l'entrainement en tennis ? 66

3 Synthèse et objectifs 69
3.1 Synthèse 69
3.2 Objectifs de la thèse 70

4 Méthodologie générale 73
4.1 Déroulement 73
4.2 Capture de mouvement en 3D 73
4.3 Protocole expérimental 74

5 Variabilité inter-individuelle et stratégies motrices liées à la cinématique du centre de masse et des genoux 79
5.1 Étude 1 : Variabilité inter-individuelle de la cinématique du centre de masse et des genoux lors du service de joueurs de tennis professionnels 79
5.1.1 Introduction 79

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

5.1.2 Méthodologie spécifique à l'étude 82
5.1.3 Résultats 85
5.1.4 Discussion 91
5.1.5 Conclusion 98
5.2 Étude 2 : Identification de stratégies motrices du service à partir des trajectoires du centre de masse à l'aide d'un clustering de données fonctionnelles multivariées 99
5.2.1 Introduction 99
5.2.2 Méthodologie spécifique à l'étude 100
5.2.3 Résultats 104
5.2.4 Discussion 109
5.2.5 Conclusion 115

6 Variabilité inter-individuelle et stratégies motrices liées à la cinématique du tronc autour de l'axe longitudinal 117
6.1 Étude 3 : Variabilité inter-individuelle de la rotation longitudinale du tronc au service et performance chez des joueurs de tennis experts 117
6.1.1 Introduction 117
6.1.2 Méthodologie spécifique à l'étude 120
6.1.3 Résultats 123
6.1.4 Discussion 130
6.1.5 Conclusion 135
6.2 Étude 4 : Identification des stratégies motrices de rotation longitudinale du tronc au service grâce au clustering par modèle de mélange gaussien 136
6.2.1 Introduction 136
6.2.2 Méthodologie spécifique à l'étude 137
6.2.3 Résultats 141
6.2.4 Discussion 148
6.2.5 Conclusion 152
6.3 Étude 5 : Les capacités de dissociation et les amplitudes maximales de rotation du tronc mesurées au cours de tests cliniques et fonctionnels influencent-elles la cinématique du service des joueurs de tennis experts ? 154
6.3.1 Introduction 154
6.3.2 Méthodologie spécifique à l'étude 157

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

6.3.3 Résultats 161
6.3.4 Discussion 162
6.3.5 Conclusion 165

7 Latéralité oculo-manuelle et service au tennis 167
7.1 Étude 6 : Effet de la latéralité oculo-manuelle sur la biomécanique du service 167
7.1.1 Introduction 167
7.1.2 Méthodologie spécifique à l'étude 170
7.1.3 Résultats 173
7.1.4 Discussion 174
7.1.5 Conclusion 178

8 Discussion et conclusion générale 181
8.1 Résumé des principaux résultats 181
8.2 Implications pratiques 184
8.3 Limites de la thèse 185
8.4 Perspectives de la thèse 186

Bibliographie 189

Liste des contributions 227

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Chapitre 1

Introduction

Le tennis est l'un des sports les plus populaires au monde avec environ 106 millions de pratiquants, selon les données de *l'ITF Global Tennis Report 2024* (International Tennis Federation, 2024). Sa pratique a augmenté de 25,6 % en 5 ans entre 2019 et 2024 (International Tennis Federation, 2024). Parmi ces millions de pratiquants, il existe une élite constituée d'environ 3 000 joueurs et joueuses de très haut niveau qui évoluent sur les circuits professionnels ATP (Association of Tennis Professionals) et WTA (Women's Tennis Association). La recherche de la haute performance est au cœur des préoccupations quotidiennes de ces joueurs et de leur entourage (entraîneurs, préparateurs physiques, médecins, kinésithérapeutes...) qui recherchent à améliorer les aspects physiques, tactiques, psychologiques et techniques de leur jeu.

En raison de son impact direct sur le jeu et de son lien étroit avec la performance (C. D. Johnson & McHugh, 2006 ; Ma et al., 2013), le service occupe une place centrale dans le tennis moderne (Elliott, 2006). Il a donc fait l'objet de nombreuses études biomécaniques au cours de ces dernières décennies visant à analyser les aspects cinématiques et dynamiques du geste à haut niveau dans le but d'optimiser la performance. En effet, la technique gestuelle joue un rôle déterminant dans l'efficacité d'une frappe au tennis. Si ces études ont permis de mieux comprendre les déterminants globaux de la performance au service, elles ont généralement utilisé une méthodologie générale et descriptive du mouvement basée sur des valeurs cinématiques et/ou dynamiques moyennes pour une population de joueurs donnée. De ce fait, les résultats et les conclusions mis en avant dans ces études n'ont pas permis de rendre compte de la diversité des stratégies motrices qui pourraient exister à haut niveau dans l'exécution du service. Ainsi, la variabilité inter-individuelle du service au tennis mérite d'être davantage étudiée. Dans la littérature scientifique, cette variabilité sur le plan biomécanique est désormais reconnue comme un élément précieux dans l'analyse du mouvement, car elle permet de mettre en lumière l'existence de solutions motrices différentes pour atteindre un même niveau de performance (Davids et al., 2003 ; Glazier & Mehdizadeh, 2019). Plusieurs facteurs individuels pourraient aussi expliquer

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

cette variabilité comme les paramètres anthropométriques, les caractéristiques physiques (force maximale, propriétés des muscles et tendons, puissance neuromusculaire), ainsi que les préférences motrices et les types de contractions musculaires préférentielles.

La prise en compte très limitée de la variabilité inter-individuelle dans la majorité des études biomécaniques consacrées au service a favorisé le développement de modèles gestuels dits « idéaux », construits à partir de valeurs moyennes des paramètres cinématiques observés soit au sein d'échantillons de joueurs de haut niveau, soit par la comparaison de groupes de joueurs ayant des niveaux d'expertise différents (Fleisig et al., 2003 ; Kovacs & Ellenbecker, 2011b ; Martin, Bideau, Ropars et al., 2014 ; Whiteside et al., 2013b). Par conséquent, certains entraîneurs considèrent ces moyennes et ces modèles comme des objectifs à atteindre pour la motricité de leurs joueurs et tendent à imposer un schéma moteur unique pour l'exécution du service (Fetisova, 2021). Dans ce cas de figure, l'application du principe d'individualisation s'avère limitée, restreignant ainsi la découverte de solutions motrices alternatives et personnelles par les joueurs.

L'idée selon laquelle il existerait une seule et meilleure technique a toutefois été remise en question par les théories dynamiques du contrôle moteur. Si ces approches reconnaissent un rôle positif à la variabilité inter-individuelle et l'émergence de stratégies motrices distinctes, l'identification de ces stratégies et l'évaluation de leur impact sur la performance au service n'ont jamais été réalisées.

Par conséquent, ce travail de thèse a pour objectif d'approfondir les connaissances sur la biomécanique du service, en étudiant la variabilité inter-individuelle et en identifiant les différentes stratégies motrices mises en œuvre par les joueurs de tennis experts, ainsi que leur impact sur la performance.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Chapitre 2

Revue de littérature

2.1 Le service au tennis : une arme et un défi technique

2.1.1 Rôle du service dans la performance des joueurs de tennis professionnels

Le service au tennis est le coup qui permet au joueur de mettre la balle en jeu. C'est également le seul coup où le joueur dispose d'un contrôle total sur son exécution, le classant parmi les habiletés fermées. Selon les règles de la Fédération Internationale de Tennis (ITF), les joueurs doivent alterner leurs services depuis deux positions spécifiques : diagonale des égalités (à droite du court) et diagonale des avantages (à gauche du court). Chaque service doit être exécuté derrière la ligne de fond de court en diagonale vers le carré de service opposé, tout en franchissant un filet de 0,914 m de hauteur en son centre (International Tennis Federation, 2021).

Le service est sans conteste le coup le plus déterminant au tennis, comme en témoignent de nombreuses statistiques. Tout d'abord, il est prédominant dans le jeu, représentant entre 45 % et 60 % des frappes jouées lors d'un jeu de service, selon la surface sur laquelle se déroule le match (C. D. Johnson & McHugh, 2006). Par ailleurs, des analyses statistiques mettent en évidence l'avantage décisif que procure un service efficace dans la dynamique d'un match. Reid, McMurtrie et Crespo (2010) ont montré que les joueurs masculins du top 100 ATP ont remporté en moyenne 78,7 % de leurs jeux de service, contre seulement 22,4 % de leurs jeux en retour lors de la saison 2007. Cette domination du serveur se retrouve également sur terre battue à Roland Garros avec 62,1 % des points remportés par le serveur, contre 37,9 % par le relanceur (Gillet et al., 2009), et elle tend à s'accentuer avec l'expertise des joueurs (Hizan et al., 2011).

Cet avantage du serveur s'explique par l'opportunité qu'offre le service de marquer

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

des points de manière directe. En effet, selon Mecheri et al. (2016), près de 70 % des points obtenus au service sont des « points gratuits », où l'adversaire ne renvoie pas la balle. L'impact du service est particulièrement visible dans les échanges courts, où le serveur conserve un taux de réussite plus élevé. En effet, les données issues des matchs de simple des tournois du Grand Chelem joués en 2007 montrent que le serveur gagne 97,5 % des points en 1 à 2 frappes, contre 62,4 % en 3 à 4 frappes, et 49,7 % au-delà de 5 frappes (O'Donoghue & Brown, 2008). Les fortes contraintes spatio-temporelles imposées au receveur lors d'un premier service rendent difficile pour ce dernier de rétablir l'équilibre en un ou deux coups de fond de court. Cet avantage est encore amplifié sur les surfaces les plus rapides, comme le gazon, où la vitesse de la balle accentue la difficulté pour le receveur (Carboch & Kočíb, 2016 ; C. D. Johnson & McHugh, 2006). Il varie également en fonction du sexe (Hizan et al., 2011 ; O'Donoghue & Brown, 2008). Les joueurs de sexe masculin remportent davantage de points grâce à leur service et parviennent plus fréquemment à cibler les zones plus excentrées dans le carré de service.

L'importance stratégique du service chez les joueurs de tennis experts a conduit au développement d'indicateurs statistiques spécifiques visant à en mesurer l'efficacité. Parmi ceux-ci, le pourcentage de points remportés sur la première balle de service demeure l'un des indicateurs les plus pertinents de la performance des joueurs professionnels (Bozděch et al., 2024 ; Fernández-García et al., 2019 ; Ma et al., 2013). Plus récemment, le « *Serve Effectiveness Rate* », introduit par l'ATP en 2023, évalue la fréquence à laquelle le service procure un avantage direct ou indirect lors d'un point, en prenant en compte les aces, les services gagnants et les premières balles offensives. Cet indicateur atteint des valeurs élevées chez les meilleurs joueurs, dépassant parfois 70 % d'efficacité.

2.1.2 Complexité biomécanique et exigences physiques du service

Le service est souvent décrit comme étant le coup le plus complexe à réaliser au tennis (Kovacs & Ellenbecker, 2011b). En effet, il demande non seulement de dissocier les mouvements du bras qui effectue le lancer de balle avec ceux du bras dominant qui tient la raquette mais aussi de coordonner les actions des membres inférieurs, du tronc et du haut du corps. La complexité de cette frappe sur le plan biomécanique réside dans le fait que le joueur doit créer et combiner des rotations articulaires et segmentaires à une grande vitesse au sein d'une chaîne cinématique initiée par l'action des jambes et finalisée les mouvements

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

de la raquette (Bahamonde, 2000 ; Elliott, 2006 ; Fleisig et al., 2003 ; Kovacs & Ellenbecker, 2011b). Le respect de cette séquence de rotations est fondamental pour assurer à la fois la production d'une frappe puissante, permettant d'atteindre des vitesses supérieures à 200 km · h^{-1} chez les hommes et 180 km · h^{-1} chez les femmes, et la préservation de l'intégrité physique du joueur. Une mauvaise exécution spatio-temporelle de la chaîne cinématique proximo-distale peut en effet augmenter le niveau de ces contraintes et donc les risques de blessures articulaires (Martin, Kulpa, Ropars et al., 2013 ; Reid et al., 2008). De surcroît, une précision extrême est requise lors de l'impact balle-raquette pour assurer la réussite de la frappe. Une variation d'à peine 4° dans l'orientation de la raquette par rapport à l'horizontale peut déterminer si la balle atterrit ou non dans le carré de service (Duboy et al., 1994). Cette fenêtre angulaire varie en fonction de deux principaux facteurs : la hauteur d'impact et la vitesse de balle. Plus la hauteur d'impact est élevée, plus cette fenêtre s'élargit. À l'inverse, plus la vitesse de la balle est élevée, plus cette fenêtre se réduit (Brody, 2006). Ainsi, le joueur doit trouver le meilleur compromis entre hauteur d'impact et vitesse de balle.

Le service n'est pas seulement un coup techniquement exigeant, il représente également l'un des gestes les plus contraignants sur le plan physique. Il implique des contractions musculaires violentes au niveau de groupes musculaires tels que les quadriceps, les ischio-jambiers, les mollets, les muscles abdominaux et obliques, les érecteurs du rachis, le grand pectoral, le grand dorsal, le triceps brachial et les muscles de l'avant-bras (J. Chow et al., 2009 ; Girard et al., 2005 ; Reid et al., 2003). Il peut aussi entraîner des contraintes articulaires importantes en termes de forces et de moments de force au niveau du tronc, de la charnière lombaire, de l'épaule et du coude, augmentant ainsi le risque de blessures (Kovacs & Ellenbecker, 2011b). La sollicitation physique dépend également de la répétition du geste. Un joueur de tennis effectue environ 5 400 services au cours d'une saison compétitive, sur la base de 40 services par set (N. L. Myers et al., 2016).

2.2 Évaluation de la performance au service

2.2.1 Indicateurs de performance

2.2.1.1 Vitesse de balle

Souvent évaluée par des radars sur le circuit professionnel et en conditions de laboratoire, la vitesse de balle correspond à la vitesse maximale de la balle au moment où

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

elle quitte la raquette. Selon les données recueillies lors des tournois du Grand Chelem en 2016, les joueurs masculins professionnels ont atteint une vitesse moyenne de première balle de 183,5 $km \cdot h^{-1}$ et une vitesse maximale moyenne de 204,6 $km \cdot h^{-1}$ (Vaverka et al., 2018). C'est l'un des principaux indicateurs de performance au service tant chez les joueurs professionnels que chez les joueurs compétiteurs juniors (Colomar, Corbi & Baiget, 2022 ; Fett et al., 2020 ; Kovacs & Ellenbecker, 2011a ; Whiteside & Reid, 2017). A ce titre, elle est très souvent mentionnée et analysée dans la littérature (Baiget et al., 2016 ; Colomar, Corbi & Baiget, 2022 ; Fett et al., 2020 ; Martin, Kulpa, Delamarche & Bideau, 2013 ; Tubez et al., 2017). C'est aussi un très bon indicateur du niveau d'expertise du joueur (González-González et al., 2018 ; Söğüt, 2017) et un élément essentiel pour gagner des matchs (Fernández-García et al., 2019 ; Whiteside & Reid, 2017). En effet, une vitesse de service plus élevée est associée à une hausse du pourcentage de points gagnés sur cet engagement, du nombre d'aces et à une réduction du nombre de services retournés par l'adversaire (Haake & Coe, 2000 ; Mecheri et al., 2016 ; O'Donoghue & Ballantyne, 2004) car elle augmente la contrainte temporelle imposée au relanceur et réduit sa capacité à anticiper, à s'organiser et à contrôler son retour.

2.2.1.2 Vitesse de la tête de raquette

En contexte de laboratoire, la vitesse de la tête de raquette lors du service est souvent calculée grâce à la capture de mouvement en 3D basée sur des marqueurs rétroréfléchissants. La valeur maximale, atteinte quelques millisecondes avant l'impact, est fréquemment prise en compte dans la littérature car elle influence significativement la vitesse de la balle au service (J. Chow et al., 2003). Chez les joueurs de haut niveau, les vitesses maximales de la tête de raquette au service se situent généralement entre 33 et 50 $m \cdot s^{-1}$ (Reid et al., 2011 ; Sweeney et al., 2012). Les variations observées entre les études peuvent s'expliquer par des différences d'ordre méthodologique (Gordon & Dapena, 2006).

2.2.1.3 Hauteur d'impact

La hauteur d'impact au service est un autre paramètre important. Elle est définie comme la distance verticale entre la balle et le sol au moment de l'impact (Figure 2.1). Cette hauteur est influencée par plusieurs facteurs, notamment la taille du joueur, la hauteur de décollage par rapport au sol, la hauteur de l'épaule dominante, les longueurs du membre supérieur dominant et de la raquette, ainsi que la profondeur de l'impact (Figure 2.1) (Vaverka & Cernosek, 2013). La taille du joueur est le facteur le plus déterminant,

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

suivi de la hauteur de décollage qui peut modifier la hauteur d'impact de 20 à 40 cm (Vaverka et al., 2005).

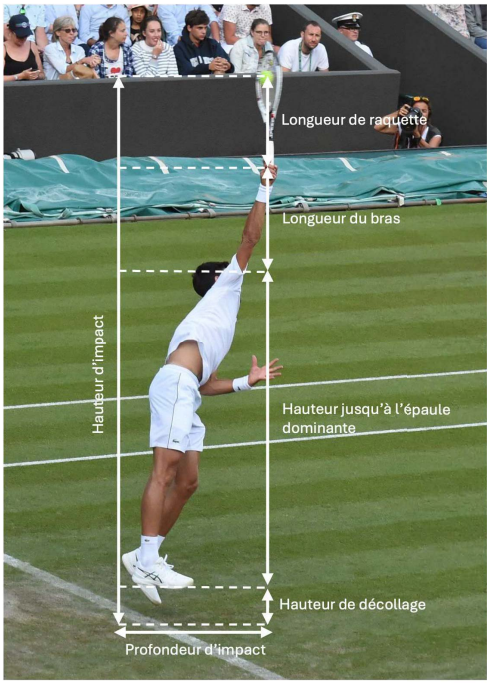


FIGURE 2.1 – Facteurs influençant la hauteur d'impact au service

Les meilleurs serveurs frappent la balle à une hauteur équivalente à 1,5 fois leur taille. Ce critère est l'un des plus stables chez les joueurs professionnels (J. Chow et al., 2003 ; Reid et al., 2011). Plus le joueur frappe la balle à une hauteur élevée, plus sa marge de sécurité augmente par rapport au filet et plus la fenêtre d'impact disponible dans le carré adverse s'élargit, ce qui accroît les chances de réaliser des services plus rapides et plus précis (Brody, 2006 ; Dossena et al., 2016). En conséquence, les joueurs de grande taille bénéficient d'un avantage au service.

Brody (2006) s'est intéressé au lien entre la hauteur d'impact et la vitesse de balle à travers les lois de la physique. D'après son analyse, frapper fort réduit le temps d'action de la gravité, ce qui rend plus difficile le fait d'envoyer la balle dans les limites du carré de service adverse. Pour compenser cette difficulté, il souligne qu'un point d'impact plus élevé permettrait d'avoir un angle de projection plus grand (Figure 2.2), ce qui offrirait une plus grande marge de sécurité et la possibilité de servir plus fort. Dans ce même contexte, la constance de l'angle de projection est un paramètre clé au plus haut niveau. En comparant la cinématique de services réussis et ratés, Whiteside et al. (2013a) ont montré que les

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

services ratés, notamment ceux qui finissent dans le filet, sont principalement causés par des angles de projection nettement inférieurs à l'horizontal. Par conséquent, un point d'impact plus élevé permet d'élargir cette fenêtre angulaire, réduisant ainsi les risques de faute dans le filet.



FIGURE 2.2 – Représentation de l'angle de projection défini entre la trajectoire de la balle au moment de l'impact et l'horizontale

2.2.1.4 Précision et zone visée

Milos Raonic, l'un des meilleurs serveurs au monde dans les années 2010, a affirmé : « Si vous touchez la ligne, peu importe que ce soit à 190 $km \cdot h^{-1}$ ou à 225 $km \cdot h^{-1}$ [...] Je vise à environ un ou deux centimètres à l'intérieur de la ligne. » (Hodgkinson, 2015). Cette déclaration met en évidence l'importance de la zone atteinte dans le carré de service adverse pour perturber le relanceur. Whiteside et Reid (2017) ont déterminé les caractéristiques de 25 680 premiers services frappés par 151 joueurs professionnels à l'Open d'Australie via une approche d'apprentissage non supervisée. Les services qui deviennent des aces sont généralement positionnés plus près des lignes et plus excentrés, comparés aux services que l'adversaire parvient à renvoyer (Figure 2.3). Plus précisément, cette étude a révélé que la probabilité de frapper un ace dépend principalement de trois

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

facteurs : la direction du service (les services orientés à plus de 5,88° par rapport au retourneur ont davantage de chances d'être des aces), la proximité de l'atterrissage par rapport à la ligne du carré de service (une balle atterrissant à moins de 15,27 cm de la ligne augmente les chances de réaliser un ace) et la vitesse du service. Ces résultats sont comparables à ceux de Fitzpatrick et al. (2024) et Mecheri et al. (2016), ayant mis en évidence que les services atterrissant près des lignes et plus en profondeur dans le carré adverse offrent une plus grande probabilité de gagner le point.



FIGURE 2.3 – Représentation schématique des zones d'atterrissage de la balle pour les aces (en haut) et les services retournés (en bas), d'après Whiteside et Reid (2017)

2.3 Analyse cinématique de la 1re balle de service : déterminants biomécaniques consensuels de la performance

2.3.1 Considérations méthodologiques

Bien que la performance au tennis soit multifactorielle, l'efficacité des frappes est principalement déterminée par la qualité de la technique gestuelle (Elliott, 2006). Optimiser

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

le mouvement est essentiel pour le développement du joueur, l'amélioration de la performance et la prévention des blessures (Knudson, 2007). L'analyse cinématique du service permet de mieux comprendre la technique utilisée par les joueurs de tennis experts sur les plans spatial et temporel et peut jouer un rôle clé dans l'optimisation gestuelle (Elliott, 2006). Au cours des dernières décennies, la recherche sur la biomécanique du service s'est principalement focalisée sur l'identification des facteurs biomécaniques déterminants dans la performance. Les approches ayant été les plus couramment utilisées dans la littérature sont les suivantes :

— étude des relations entre les moments cinétiques des segments corporels (membres supérieurs, tronc, membres inférieurs) et la vitesse de balle (Bahamonde, 2000 ; Elliott et al., 1995 ; Girard et al., 2007 ; Martin, Kulpa, Delamarche & Bideau, 2013)

— analyse des liens entre la transmission de l'énergie au sein de la chaîne cinématique et la vitesse de balle (De Subijana & Navarro, 2010 ; Elliott et al., 1995 ; Fleisig et al., 2003 ; Kovacs & Ellenbecker, 2011b ; Martin, Bideau, Bideau et al., 2014 ; Sweeney et al., 2012).

— identification des principaux contributeurs à la vitesse de la tête de raquette (J. Chow et al., 2003 ; Gordon & Dapena, 2006 ; Sprigings et al., 1994 ; Tanabe & Ito, 2007).

D'autres travaux ont comparé les paramètres biomécaniques en fonction :

— des différentes diagonales de service (égalité *vs.* avantage) (Fett et al., 2020 ; Reid et al., 2011)

— des types de service (à plat, slicé, lifté ; première *vs.* seconde balle) (Abrams et al., 2014 ; Carboch et al., 2018 ; J. Chow et al., 2003, 2009 ; Connolly et al., 2021 ; Mecheri et al., 2016 ; Mourtzios et al., 2022).

— de l'âge, du niveau d'expertise ou du sexe (Connolly et al., 2019 ; Elliott et al., 1986 ; Fleisig et al., 2003 ; Hernández-Davó et al., 2019 ; Martin, Bideau, Ropars et al., 2014 ; Touzard et al., 2019 ; Tubez et al., 2021 ; Wang et al., 2021 ; Whiteside et al., 2013b)

2.3.2 Les phases et les moments clés du service

Afin de faciliter l'analyse du service dans la littérature, ce mouvement est généralement décomposé en plusieurs phases délimitées par des événements clés selon différentes

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

approches. L'approche la plus couramment utilisée distingue trois phases principales : la préparation, la propulsion et le mouvement de la raquette vers l'avant (Fett et al., 2021 ; Tubez et al., 2021 ; Whiteside et al., 2013a, 2013b) (Figure 2.4) :

— **Phase de préparation** : Elle commence avec le lancer de la balle (LB) et se termine lorsque le joueur atteint la position d'armée (ARM). Au début de cette phase, la balle quitte la main non-dominante du joueur et s'élève vers son zénith. Parallèlement, le tronc entame une rotation longitudinale vers le côté dominant du corps (aussi appelé « vissage » par les entraîneurs), créant ainsi un angle de séparation entre la ligne des épaules et la ligne des hanches dans le plan transverse. Dans le même temps, les membres inférieurs commencent leur flexion. La flexion maximale des membres inférieurs se synchronise avec le moment de l'ARM, celui-ci marquant la fin de la phase de préparation.

— **Phase de propulsion** : Elle débute lorsque le joueur atteint la position d'armée et se poursuit jusqu'à ce que la raquette atteigne son point le plus bas (PLBR). Durant cette phase, on observe une triple extension des chevilles, des genoux et des hanches, entraînant le décollage du joueur au-dessus du sol et une phase de vol.

— **Phase de mouvement de la raquette vers l'avant** : Elle commence à partir de PLBR et se termine au moment de l'impact balle-raquette (IMP). Cette phase se caractérise par l'accélération et la réorientation de la raquette vers l'avant, les rotations du tronc autour des axes longitudinal, sagittal et transverse, la rotation interne de l'épaule, la flexion du coude et du poignet.

La majorité des études biomécaniques portant sur le haut du corps lors du service ont adopté cette décomposition (Bahamonde, 2000 ; Elliott, Fleisig et al., 2003 ; Giblin et al., 2017 ; Martin, Kulpa, Ropars et al., 2013 ; Reid & Giblin, 2015 ; Whiteside et al., 2013a, 2013b). En effet, elle permet de se focaliser sur les phases de préparation et d'armée, au cours desquelles ce sont surtout les mouvements de l'épaule et du tronc qui influencent la performance et le risque de blessure (Elliott, 2006).

Les études analysant le rôle du bas du corps au service ont souvent mis l'accent sur les forces de réaction du sol, les angles et les vitesses angulaires des genoux et des chevilles au cours des phases de flexion (excentrique) et d'extension (concentrique) des membres inférieurs (Elliott & Wood, 1983 ; Fourel et al., 2024 ; Girard et al., 2005 ; Hornestam et al., 2021). Dans ce contexte, la phase de préparation, qui initie le stockage de l'énergie dans les structures passives élastiques des membres inférieurs, est abordée davantage sous

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

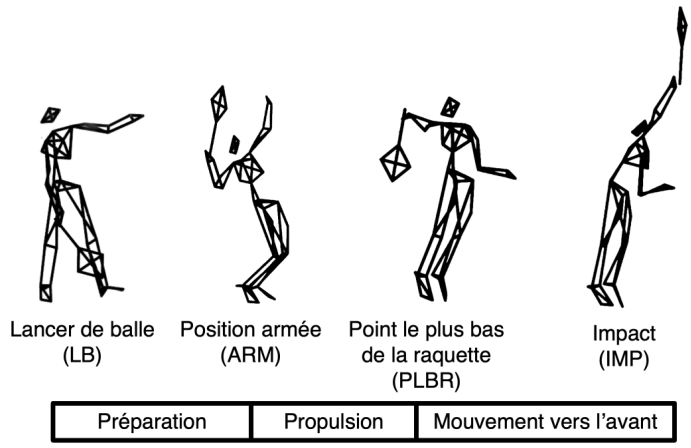


FIGURE 2.4 – Décomposition du service en trois phases : la préparation, la propulsion et le mouvement de la raquette vers l'avant, selon les travaux de Fett et al. (2021), Tubez et al. (2021) et Whiteside et al. (2013a, 2013b)

un angle dynamique que cinématique, en raison de son impact direct sur la génération des forces de réaction au sol.

2.3.3 Enchaînement segmentaire proximo-distal et vitesses linéaires et angulaires

De nombreux travaux ont cherché à décrire et identifier les principaux facteurs biomécaniques de la chaine cinématique contribuant à un service performant (Elliott, 2006). Au sein de cette séquence proximo-distale, le service du joueur de tennis est d'abord initié par les segments proximaux du corps, les plus lourds et larges (membres inférieurs et tronc), avant de se propager vers les segments plus rapides et plus petits (bras, avant-bras, main, raquette) (Marshall & Elliott, 2000 ; Martin, 2018). L'enchainement progressif des rotations articulaires et segmentaires permet de transférer l'énergie tout au long de cette séquence (Martin, Bideau, Bideau et al., 2014). Selon le principe de sommation des vitesses (Knudson, 2007), chaque articulation produit une vitesse linéaire supérieure à celle qui la précède, ce qui permet d'atteindre une vitesse maximale au niveau de la raquette, et cela en respectant un ordre proximo-distal (Tableau 2.1).

Cette séquence proximo-distale s'accompagne de vitesses angulaires élevées, lesquelles constituent des déterminants clés de la performance. Au début du mouvement, la flexion des genoux, des chevilles et des hanches est suivie d'une extension extrêmement rapide de ces articulations, propulsant ainsi le joueur en l'air (De Subijana & Navarro, 2010 ;

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Articulation	**Vitesse linéaire maximale ($m \cdot s^{-1}$)**	**Temps d'apparition avant l'impact (s)**
Genou	1,5 ± 0,3	0,19 ± 0,22
Hanche	2,0 ± 0,4	0,17 ± 0,02
Épaule	2,7 ± 0,5	0,14 ± 0,01
Coude	6,7 ± 0,7	0,13 ± 0,01
Poignet	10,3 ± 0,8	0,08 ± 0,01
Raquette	34,8 ± 3,4	0,04 ± 0,01

TABLE 2.1 – Évolution de la vitesse linéaire maximale par articulation. Tableau adapté de Elliott et al. (1986).

Fleisig et al., 2003 ; Reid et al., 2008). Le mouvement du joueur se poursuit ensuite à travers les rotations transverse, frontale et sagittale du tronc. Les vitesses angulaires générées au cours de ces rotations contribuent à la transmission d'énergie tout au long de la chaîne cinématiques (Bahamonde, 2000 ; De Subijana & Navarro, 2010 ; Martin, Kulpa, Delamarche & Bideau, 2013). Ensuite, c'est au tour de l'épaule, du bras, de l'avant-bras, du poignet puis de la main d'effectuer des rotations très rapides afin d'augmenter la vitesse de la tête de raquette (Elliott, 2006 ; Elliott et al., 1995 ; Marshall & Elliott, 2000 ; Tanabe & Ito, 2007) (Tableau 2.2). Par ailleurs, la pronation de l'avant-bras et l'extension du coude permettent d'orienter la raquette vers le futur point d'impact (Marshall & Elliott, 2000).

Mouvement / rotation	**Vitesse angulaire maximale ($° \cdot s^{-1}$)**	**Temps d'apparition avant l'impact (s)**
Extension des genoux	800 ± 400	0,18 ± 0,06
Flexion du tronc	280 ± 40	0,08 ± 0,02
Rotation longitudinale des hanches	440 ± 90	0,05 ± 0,03
Rotation longitudinale des épaules	870 ± 120	0,06 ± 0,01
Extension du coude	1510 ± 310	0,04 ± 0,01
Flexion du poignet	1950 ± 510	0,03 ± 0,01
Rotation interne de l'épaule	2420 ± 590	0,01 ± 0,02

TABLE 2.2 – Vitesses angulaires maximales et timing d'apparition au cours du service chez des joueurs et joueuses de tennis professionnels. Tableau adapté de Fleisig et al. (2003).

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

2.3.4 Actions et rôles des membres inférieurs dans la performance au service

Pour de nombreux biomécaniciens, il est primordial d'analyser le service dès la phase de préparation lorsque les pieds sont en contact avec le sol (Elliott, Reid & Crespo, 2003). En effet, les jambes qui constituent le premier maillon de la chaîne cinématique (De Subijana & Navarro, 2010 ; Elliott & Wood, 1983 ; Kibler, 1995), génèrent de grandes quantités de mouvement linéaire et angulaire pour initier la production et le transfert d'énergie vers le tronc, les membres supérieurs, puis la raquette (Dossena et al., 2016 ; Girard et al., 2007 ; Kibler, 1995 ; Reid et al., 2008). Selon certaines études, près de 50 % de l'énergie ou de la force générée durant le service chez les joueurs professionnels provient des jambes et du tronc (Dossena et al., 2016 ; Kibler, 1995). Chez des joueurs professionnels, l'absence d'utilisation des membres inférieurs entraîne une baisse de vitesse du service de l'ordre de 25 km $\cdot$ h^{-1} soit 15 % (Girard et al., 2007). La contribution des jambes dans la performance du service semble augmenter avec l'âge (Whiteside et al., 2013b). Sur le plan scientifique, les études s'étant focalisées sur les membres inférieurs au service sont moins nombreuses que celles portant sur les membres supérieurs (Sweeney et al., 2012).

Les actions des membres inférieurs lors du service se caractérisent par la mise en œuvre du cycle d'étirement-raccourcissement (Girard et al., 2005). Ce cycle se compose de deux phases successives qui doivent s'enchaîner dans un laps de temps très bref : la phase de flexion puis la phase d'extension au niveau des genoux et des chevilles.

2.3.4.1 Flexion des membres inférieurs

La flexion des genoux et des chevilles permet de mettre en tension les muscles des membres inférieurs, notamment les quadriceps et les triceps suraux, ce qui permet de stocker une certaine quantité d'énergie élastique. En fin de phase de préparation, les joueurs professionnels atteignent une flexion maximale des genoux qui coïncide le plus souvent avec le moment où la raquette atteint la position armée (Bonnefoy et al., 2009 ; Kovacs & Ellenbecker, 2011b ; Tubez et al., 2021 ; Whiteside et al., 2015).

2.3.4.2 Extension des membres inférieurs et impact sur la performance

La phase de flexion des jambes est suivie d'une poussée explosive des membres inférieurs basée sur des vitesses d'extension extrêmement rapides, permettant au joueur de s'élever et d'initier les mouvements du tronc (Kovacs & Ellenbecker, 2011b). Le concept

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

de « triple extension » désigne l'extension simultanée et maximale des chevilles, des genoux et des hanches. Il s'agit d'un mécanisme fondamental dans les mouvements de saut (Cormie et al., 2011). La cinématique des membres inférieurs débute par l'extension des chevilles, atteignant des valeurs maximales d'environ $600° \cdot s^{-1}$ pour la cheville avant et $500° \cdot s^{-1}$ pour la cheville arrière (Tubez et al., 2015). Les vitesses maximales d'extension des genoux varient selon l'âge et le niveau de jeu. Au niveau du genou avant, elles sont proches de $800 \pm 400° \cdot s^{-1}$ chez les joueurs de haut niveau (Fleisig et al., 2003), tandis que des vitesses plus faibles ont été observées chez les jeunes joueurs, de l'ordre de de $444 \pm 108° \cdot s^{-1}$ (Fett et al., 2021) et $373 \pm 60° \cdot s^{-1}$ (Touzard, 2021). La vitesse maximale d'extension du genou arrière semble moins sensible à l'âge et au niveau de jeu. Elle atteint des valeurs comparables chez les joueurs experts, de l'ordre de $533 \pm 69° \cdot s^{-1}$ chez les joueurs experts (Reid et al., 2008) et chez des joueurs plus jeunes ou moins expérimentés, avec des valeurs avoisinant $540 \pm 80° \cdot s^{-1}$ (Fett et al., 2021) et $522 \pm 96° \cdot s^{-1}$ (Touzard, 2021).

Plusieurs études ont démontré que l'amplitude et la vitesse d'extension des genoux influencent la performance (Fleisig et al., 2003 ; Hornestam et al., 2021 ; Reid et al., 2008). En effet, une amplitude d'extension insuffisante des genoux, causée par une amplitude de flexion limitée, réduit la vitesse de la raquette et par conséquent, celle de la balle après l'impact chez des joueurs de haut niveau (Reid et al., 2008). Hornestam et al. (2021) ont démontré que les jeunes joueurs avec une vitesse maximale d'extension des genoux supérieure augmentaient la vitesse de leur raquette avant l'impact. Si Wong et al. (2014) n'ont trouvé aucune relation significative entre l'amplitude et la vitesse d'extension de la cheville arrière et la vitesse de balle au service, ils ont, en revanche, mis en évidence une corrélation positive entre l'amplitude d'extension du genou arrière et la vitesse de balle ($r = 0{,}705$). Des corrélations significatives ont aussi été obtenues entre les vitesses maximales d'extension du genou et de la hanche arrière et la vitesse de balle ($r = 0{,}75$ et $r = 0{,}66$, respectivement). En effet, l'augmentation de la vitesse d'extension du genou durant la phase d'accélération favoriserait la transmission d'énergie entre les membres inférieurs et le haut du corps (De Subijana & Navarro, 2010 ; Kibler, 1995)

La vitesse verticale maximale de la hanche arrière, considérée comme un indicateur de la qualité de la triple extension des jambes semble augmenter avec l'âge des joueurs et le niveau de pratique (Whiteside et al., 2013b). Les vitesses verticales maximales sont significativement plus élevées pour la hanche arrière que pour la hanche avant (Sweeney et al., 2012 ; Whiteside et al., 2013b) et sont positivement corrélées avec la vitesse verticale de l'épaule dominante ($r = 0{,}80$ pour la hanche arrière ; $r = 0{,}72$ pour la hanche avant)

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

(Sweeney et al., 2012). Les valeurs de référence de ces vitesses sont présentées dans le Tableau 2.3.

Étude	**Sexe**	**Niveau**	**Hanche avant** $(\mathbf{m \cdot s^{-1}})$	**Hanche arrière** $(\mathbf{m \cdot s^{-1}})$
Elliott et al. (1986)	M	Universitaire	/	2,0 ± 0,4
Sweeney et al. (2012)	M	Professionnel	1,63 ± 0,3	2,08 ± 0,3
Whiteside et al. (2013b)	F	Professionnel	1,73 ± 0,12	2,30 ± 0,11
Connolly et al. (2021)	F & H	Professionnel	1,45 ± 0,22	1,90 ± 0,22

TABLE 2.3 – Vitesses verticales maximales des hanches avant et arrière obtenues dans la littérature. M : masculin ; F : féminin.

2.3.4.3 Techniques d'appuis au service

Différentes techniques d'appuis peuvent être observées chez les joueurs lors de la phase de préparation. Durant cette phase, certains joueurs déplacent le pied arrière pour le rapprocher du pied avant. Cette technique, désignée sous le terme de « relais d'appuis » (Figure 2.5.A), contraste avec celle d'autres joueurs, qui maintiennent leurs appuis écartés et fixes au sol du début du mouvement jusqu'à la phase d'extension des membres inférieurs et le décollage des pieds. Cette dernière est communément appelée technique des « appuis écartés » (Figure 2.5.B). Une autre technique, moins fréquente, consiste à garder les pieds joints tout au long du service jusqu'au décollage (Figure 2.5.C). Selon Martin (2018), environ 70 % des joueurs professionnels utilisent la technique du relais d'appuis.

Plusieurs études ont analysé les caractéristiques de ces techniques et comparé leurs paramètres cinématiques et dynamiques, dans le but d'offrir aux entraîneurs des connaissances scientifiques permettant d'en apprécier les avantages et les inconvénients (Tableau 2.4).

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026



FIGURE 2.5 – Exemples de services avec différentes techniques d'appuis. (A) relais d'appuis (Christopher Eubanks) ; (B) Appuis écartées (Novak Djokovic) ; (C) Pieds joints (Gaël Monfils).

Études	Taille d'échantillon et niveau	Paramètres mesurés	Résultats
Bahamonde et Knudson (2001), Elliott et Wood (1983)	9 joueurs compétitifs 9 joueurs juniors compétitifs	– Forces de réaction au sol verticales et horizontales – Vitesse de raquette – Amplitudes articulaires et vitesses angulaires (genou, hanche, épaule, coude et poignet)	– Force de réaction verticale plus élevée avec RA – Force de réaction horizontale plus élevée avec AE – Amplitude et vitesse de rotation de l'épaule supérieures avec RA – Hauteur d'impact plus élevée avec RA – Pas de différence de vitesse de raquette
Reid et al. (2008)	12 joueurs experts	– Paramètres cinématiques des genoux – Vitesse résultante de la raquette – Paramètres cinématiques de l'épaule – Contraintes articulaires à l'épaule	– Aucune différence significative pour les paramètres de l'épaule, ni pour la vitesse maximale de rotation interne, l'angle d'élévation du bras et l'angle de séparation entre la RA et l'AE – Contraintes articulaires de l'épaule similaires avant et après l'impact
Martin et al. (2012)	15 joueurs et joueuses professionnels	– Vitesse de balle – Temps de montée au filet – Moments angulaires du tronc et du bras autour de l'axe transversal	– Vitesse de balle plus élevée avec RA – Temps de montée au filet plus court avec AE – Moments cinétiques du tronc et du bras plus élevés avec RA
Girard et al. (2010)	10 joueurs et joueuses compétitifs	– Distribution de la pression plantaire de la jambe avant et de la jambe arrière	– Jambes avant : pression latérale plus élevée sur l'avant-pied en RA, pression plus faible sur le talon médial qu'en AE – Jambes arrière : pression latérale sur le moyen pied plus élevée en RA, pression médiale sur le pied avant plus faible qu'en AE

TABLE 2.4 – Comparaison des paramètres cinématiques et dynamiques entre la technique du relais d'appuis et la technique des appuis écarts. RA : relais d'appuis ; AE : appuis écartés.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

L'analyse dynamique montre que les forces de réaction maximales verticales sont plus importantes avec le relais d'appuis, tandis que les forces de réaction maximales horizontales sont supérieures avec les appuis écartés (Bahamonde & Knudson, 2001 ; Elliott & Wood, 1983). Reid et al. (2008) ont observé que les joueurs avec la technique du relais d'appuis avaient une flexion maximale du genou avant de 111 ± 15°, contre 94 ± 14° pour ceux qui utilisent la technique des appuis écartés. De plus, les joueurs avec relais d'appuis possédaient une amplitude d'extension du genou arrière supérieure de 12,6° et une vitesse maximale d'extension plus élevée de 120,9° · s^{-1}). Elliott et Wood (1983) ont également observé une hauteur d'impact supérieure avec la technique du relais d'appuis. De plus, Martin et al. (2012) ont confirmé que cette dernière favorise la verticalité de la poussée des jambes, tandis que les appuis écartés facilitent davantage la propulsion vers l'avant et la montée au filet dans le cas du service-volée. Le relais d'appuis permet aussi d'augmenter la vitesse de balle, car la poussée des jambes se fait avec les pieds proches l'un de l'autre, ce qui permet d'augmenter le moment cinétique du tronc autour de l'axe transverse et donc d'influencer positivement la performance (Bahamonde, 2000 ; Martin, Kulpa, Delamarche & Bideau, 2013). Cependant, cet avantage procuré par le relais d'appuis sur la vitesse de balle n'a pas été confirmé dans toutes les études (Elliott & Wood, 1983 ; Reid et al., 2008 ; Touzard, 2021). Il convient de souligner que dans toutes ces études, la méthodologie consistait à demander aux joueurs de servir avec différentes techniques, sans tenir compte de leur technique habituelle. Bien que cette approche puisse offrir un moyen de contrôler la variabilité intra-individuelle, elle introduit également un biais potentiel lié à la maîtrise de chaque technique, ce qui pourrait affecter la performance.

Dans les études 1 et 2 de cette thèse, compte tenu des différences biomécaniques entre les techniques d'appuis et afin d'éviter tout biais méthodologique dans l'analyse de la variabilité inter-individuelle de la cinématique du centre de masse et des genoux au service, nous nous concentrerons uniquement sur la technique du relais d'appuis, qui reste la plus répandue à haut niveau.

2.3.5 Rôles du tronc dans la performance au service

2.3.5.1 Contribution du tronc à la performance

Certaines études ont estimé que les actions du tronc contribuent de façon modérée (entre 7,4 % et 9,7 %) à la vitesse de la raquette à l'impact (Elliott et al., 1995 ; Sprigings et al., 1994). Ces résultats ont amené à considérer le tronc davantage comme un simple

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

pivot assurant principalement le transfert de vitesse ou encore d'énergie des segments inférieurs vers les segments supérieurs. Néanmoins, plus récemment, Gordon et Dapena (2006) et Martin, Kulpa, Delamarche et Bideau (2013) ont montré que la contribution des actions du tronc à la vitesse de la raquette est bien plus importante quand on tient compte de l'ensemble du mouvement et pas uniquement du moment de l'impact. Le tronc, associé aux membres supérieurs, génère entre 51 % et 55 % du moment cinétique et des forces transmises à la main (Kibler, 1995). La majorité des travaux s'accorde désormais sur le fait que le tronc joue un rôle actif et déterminant dans la production de la vitesse (Bahamonde, 2000 ; J. Chow et al., 2009 ; De Subijana & Navarro, 2010 ; Kovacs & Ellenbecker, 2011b ; Martin, Kulpa, Delamarche & Bideau, 2013 ; Sweeney et al., 2012), notamment grâce aux rotations autour des axes transverse, antéro-postérieur (Figure 2.6). Si l'influence des rotations transverse et antéro-postérieure du tronc sur la performance est relativement bien établie dans la littérature, ce n'est pas le cas de la rotation longitudinale, que nous aborderons par la suite.

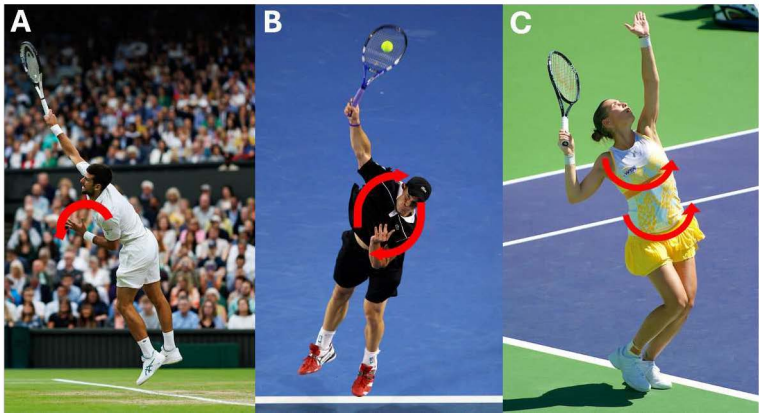


FIGURE 2.6 – Rotations du tronc autour des axes (A) transverse, (B) antéro-postérieur et (C) longitudinal

2.3.5.2 Rotation du tronc autour de l'axe transverse

Bahamonde (2000) a étudié l'évolution du moment cinétique du corps des serveurs autour des trois axes mentionnés précédemment (Figure 2.6). La majorité du moment cinétique généré autour de l'axe transverse se concentre au niveau du tronc et du bras dominant. Les joueurs qui génèrent les plus grandes valeurs de moment cinétique du tronc autour de l'axe transverse en fin de phase d'armée, sont ceux ayant les vitesses de balle les

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

plus élevées (Martin, Kulpa, Delamarche & Bideau, 2013). La rotation transverse du tronc se traduit par un passage rapide de l'hyperextension à la flexion de la colonne vertébrale avant l'impact (Figure 2.6.A) (J. Chow et al., 2009).

2.3.5.3 Rotation du tronc autour de l'axe antéro-postérieur

La rotation du tronc autour de l'axe antéro-postérieur est initiée par une inclinaison latérale vers l'arrière que l'on observe facilement à la fin de la phase de préparation (Figure 2.7). Elle s'inverse ensuite durant la phase de propulsion avec une inclinaison latérale vers l'avant, marquée par une élévation du côté dominant et un abaissement du côté non dominant du tronc. Ce phénomène est généralement appelé rotation « épaule par-dessus épaule » dans la littérature scientifique et par les entraîneurs de tennis (Figure 2.6.B). Cette dernière est fortement corrélée à la vitesse de balle au service chez les joueurs professionnels (Martin, Kulpa, Delamarche & Bideau, 2013). Elle contribue également à augmenter la hauteur d'impact en allongeant le bras dominant vers le haut (Kovacs & Ellenbecker, 2011b), et semble influencée par la poussée explosive de la jambe arrière (Sweeney et al., 2012).



FIGURE 2.7 – Inclinaison latérale du tronc vers l'arrière au moment de l'armée

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

2.3.6 Contribution des articulations et des segments du membre supérieur dominant à la performance au service

La coordination segmentaire du bras et l'avant-bras joue un rôle très important au cours de la phase d'accélération du service. Les rotations successives de ces segments participent fortement à la performance. Ainsi, la rotation interne de l'épaule et la flexion du poignet sont considérées comme les principaux contributeurs à la vitesse de la raquette à l'impact (Elliott et al., 1995). En effet, la rotation interne de l'épaule participe jusqu'à 50 % à la vitesse de la tête de raquette, tandis que la flexion du poignet y contribue à hauteur de 30 % (Elliott et al., 1995 ; Sprigings et al., 1994 ; Tanabe & Ito, 2007). Par ailleurs, d'autres mouvements du bras au cours du service, tels que l'adduction horizontale et l'abduction, participent également de manière significative à la vitesse de la tête de raquette à l'impact, avec des contributions qui varient entre 12,9 et 24,0 % (Elliott et al., 1995 ; Sprigings et al., 1994). La contribution de la pronation de l'avant-bras à la vitesse de la tête de raquette au moment de l'impact a été estimée comme faible ($\approx$ 5 %), alors que celle de l'extension du coude apparaît même négative (Elliott et al., 1995 ; Sprigings et al., 1994).

Néanmoins, Gordon et Dapena (2006) ont souligné la difficulté de mesurer avec précision l'influence respective des actions de l'épaule, du poignet et du coude au moment de l'impact, en raison de l'extension quasi complète du bras à ce moment du geste. Ces auteurs ont aussi souligné un biais méthodologique dans les travaux d'Elliott et al. (1995) et de Sprigings et al. (1994), lesquels ont évalué les contributions segmentaires à la vitesse de la tête de raquette uniquement au moment de l'impact, sans considérer l'évolution de ces contributions sur l'ensemble du mouvement de service. Cette approche conduirait ainsi à une sous-estimation du rôle de l'extension du coude dans la performance du service. Gordon et Dapena (2006) ont en effet démontré que cette action articulaire participerait à hauteur de 50 % à la vitesse de la balle environ 0,03 s avant l'impact.

Bien que la littérature biomécanique ait permis d'identifier un certain nombre de déterminants de la performance au service qui font consensus, elle suggère une variabilité importante et met en évidence des résultats parfois contradictoires, concernant certains paramètres cinématiques, lesquels seront détaillés dans la section suivante.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

2.4 Analyse cinématique du service : paramètres biomécaniques à forte variabilité et relations incertaines avec la performance

2.4.1 Action de flexion des genoux

Sur le plan pratique, les entraîneurs de tennis reconnaissent l'importance des membres inférieurs au service et se focalisent en particulier sur la force exercée dans la direction verticale. Cependant, ils déplorent une compréhension encore limitée des mécanismes qui lient l'action des jambes et la performance (Lester et al., 2023). A ce titre, l'influence de l'amplitude de flexion des genoux sur la performance au service n'est pas clairement établie dans la littérature scientifique et fait l'objet de résultats contradictoires. Cette absence de consensus peut notamment s'expliquer par la forte variabilité des résultats rapportés entre les études. En effet, les angles internes de flexion maximale des genoux avant et arrière varient respectivement de 94 à 121° et de 79 à 116° dans la littérature (Tableau 2.5). Une récente méta-analyse consacrée au service au tennis a souligné que cette importante variabilité pouvait s'expliquer par la diversité des conditions expérimentales et des populations étudiées en termes d'âge, de niveau d'expertise et de technique d'appuis (Jacquier-Bret & Gorce, 2024b).

Étude	**Population**	**Angle interne du genou avant (°)**	**Angle interne du genou arrière (°)**
Whiteside et al. (2013b)	Jeunes (n = 12) Adolescents (n = 11) Professionnels (n = 8)	105 ± 10 115 ± 7 111 ± 8	93 ± 10 93 ± 8 92 ± 8
Fett et al. (2021)	Juniors (n = 40)	110 ± 15	105 ± 11
Mourtzios et al. (2022)	Jeunes (n = 12)	121 ± 18	114 ± 14
Reid et Giblin (2015)	Juniors (n = 8)	101 ± 8	79 ± 21
Reid et al. (2008)	Professionnels (n = 12)	RA : 111 ± 15 AE : 94 ± 14	/
Brito et al. (2024)	Compétitifs (n = 18)	VSE : 113 ± 10 VSF : 116 ± 10	VSE : 113 ± 7 VSF : 116 ± 11

TABLE 2.5 – Angles internes de flexion maximale des genoux mesurés dans différentes études. RA : relais d'appuis ; AE : appuis écartés ; VSE : vitesse de service élevée ; VSF : vitesse de service faible.

Girard et al. (2007) ont montré qu'une très faible flexion des genoux (10° seulement) au service réduisait la vitesse de la balle d'environ 25 $km \cdot h^{-1}$ et la hauteur d'impact de 0,02 fois la taille de joueurs de tennis élite. Cette limitation entraînait également une

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

diminution de la force verticale maximale générée par les membres inférieurs, estimée à 34 %. Ces résultats suggèrent que la flexion maximale des genoux influence plusieurs indicateurs de la performance. A l'inverse, l'étude de Brito et al. (2024) n'a révélé aucune différence significative entre les angles de flexion maximale des genoux avant et arrière chez un groupe de joueurs servant à 155,0 ± 9,4 km · h^{-1} et un autre servant à 129,5 ± 10,6 km · h^{-1}. Ce résultat amène à penser que la flexion maximale des genoux n'impacte pas la vitesse au service. De leur côté, Hornestam et al. (2021) ont comparé deux groupes de joueurs de niveau intermédiaire différenciés selon leur degré de flexion maximale du genou avant, avec des valeurs moyennes d'angle minimal de 105° *vs.* 144°, respectivement. Les joueurs présentant une flexion plus importante augmentaient de 32 % la vitesse d'extension de leur genou avant et de 16 % la vitesse résultante de la raquette avant l'impact. En revanche, cette différence significative de 39° entre les deux groupes n'avait pas d'impact significatif sur la hauteur d'impact. Par ailleurs, Liang et al. (2023) ont comparé la cinématique des membres inférieurs chez des joueuses universitaires servant avec un relais d'appuis. Une plus grande amplitude de mouvement des hanches, des genoux et des chevilles, et une flexion plus importante des jambes étaient associées à une plus grande hauteur de décollage au service. Malheureusement, cette étude n'a mesuré ni la vitesse de la balle, ni la hauteur d'impact.

La majorité des études précédemment citées se sont focalisées sur des variables discrètes décrivant les angles de flexion maximale des genoux. En revanche, la cinématique des membres inférieurs lors de la phase de mise en charge, c'est-à-dire avant d'atteindre la flexion maximale, et son impact sur la performance n'ont pas été étudiés. Il n'existe actuellement pas de données précises quant aux stratégies mises en œuvre par les joueurs pour fléchir les membres inférieurs (durée, vitesse de flexion, amplitude de flexion). Cette absence de consensus pourrait s'expliquer par la grande variabilité des techniques d'appuis, des stratégies motrices et des profils des forces de réaction du sol au début du mouvement de service entre les joueurs (Girard et al., 2010 ; Reid et al., 2008).

L'aspect temporel du mouvement de flexion des genoux, tant en termes de durée que de synchronisation avec les autres segments corporels, notamment ceux du membre supérieur, mérite également une analyse plus approfondie. Bonnefoy et al. (2009) et Whiteside et al. (2013b) ont mis en évidence que les joueurs professionnels synchronisent temporellement la position ARM (lorsque la raquette atteint son point le plus haut en fin de préparation) et la flexion maximale des genoux. Néanmoins, Bonnefoy et al. (2009) ont observé un coefficient de dispersion élevé quant au moment d'apparition de cette synchronisation

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

d'un joueur à l'autre, suggérant que cette variabilité temporelle pourrait être liée aux différentes stratégies motrices employées par les joueurs pour atteindre la position armée.

2.4.2 Rôle différencié des jambes

Si plusieurs études ont analysé l'impact des jambes sur la performance au service, rare sont celles ayant précisé le rôle spécifique joué par chaque jambe. Selon Lester et al. (2023), cette distinction reste floue pour les entraîneurs. L'un d'eux témoigne ainsi : « Le tennis est un sport asymétrique [...] Je ne suis pas certain de la différence de charge entre les deux jambes [...] Nous ne sommes pas très bons dans ce domaine .» Les entraîneurs considèrent souvent que la jambe avant joue un rôle important dans la poussée verticale des membres inférieurs, car elle supporte généralement une plus grande part du poids du corps durant la phase de préparation (Elliott et al., 1986 ; Sweeney et al., 2012). Toutefois, la jambe arrière, qui se trouve du côté de la raquette, semble jouer un rôle plus important dans la production de la poussée, verticale et horizontale à la fois. Selon Kovacs et Ellenbecker (2011b), pour la technique des appuis écartés, la jambe arrière génèrerait l'essentiel de la poussée ascendante et propulsive, tandis que la jambe avant servirait de point d'ancrage pour faciliter la rotation du corps. Les travaux de Girard et al. (2010) ont apporté quelques précisions sur la répartition de pression entre les pieds. Leur étude a montré que 80 % de la charge totale sur le pied avant était concentrée sur l'hallux, les orteils et l'avant-pied, assurant la stabilité. En revanche, la charge sur le pied arrière était répartie de manière plus homogène, ce qui en fait une base solide pour la production de force.

2.4.3 Trajectoire du centre de masse (CoM)

D'un point de vue mécanique, le système corporel peut être appréhendé dans sa globalité par son centre de masse (CoM). Le CoM correspond à un point équivalent à la masse corporelle totale dans le système de référence global et représente la moyenne pondérée du CoM de chaque segment du corps dans l'espace en 3D (Winter, 1995). Il peut également être défini comme le point où la somme des moments de force exercés par la gravité sur chaque élément du corps est nulle. En biomécanique, l'analyse du CoM constitue une approche pertinente permettant de simplifier l'étude du mouvement global du corps (Kipp & Kim, 2020 ; Lin et al., 2003 ; Ws, 2018).

Dans le cadre d'un saut vertical, il a été démontré que les actions de flexion et exten-

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

sion des membres inférieurs impactent directement la trajectoire et la vitesse verticale du CoM (Kipp & Kim, 2020 ; Sánchez-Sixto et al., 2018 ; Zahálka et al., 2017). Ce phénomène est également présent au service. En effet, Fourel et al. (2024) ont mis en évidence une corrélation positive significative entre la vitesse verticale maximale du CoM et la hauteur d'impact de la balle. Cette relation justifie l'utilisation du CoM comme un indicateur représentant le mouvement global du corps dans l'espace et directement lié à la performance au service.

L'étude de Brito et al. (2024) est, à ce jour, la seule à avoir analysé l'évolution de la trajectoire du CoM au cours du service. Chez une population de joueurs de niveau avancé, le CoM des joueurs se trouvait en moyenne à 0,99 ± 0,04 m du sol en position initiale. Lors de la flexion maximale des jambes, il s'abaissait de $-4,6$ %, atteignant 0,91 ± 0,05 m, avant de s'élever à 1,11 ± 0,05 m à l'impact, soit une position environ 6,4 % au-dessus de la hauteur initiale (Figure 2.8). L'analyse des indicateurs de dispersion et des écarts types associés à ces valeurs moyennes mettent en évidence l'existence d'une variabilité inter-individuelle des déplacements du CoM, aussi bien sur le plan vertical qu'horizontal. Cette variabilité paraît plus marquée lors de la phase de préparation, comprise entre le début du mouvement de la raquette vers l'arrière et l'instant de flexion maximale des jambes, tandis qu'elle semble plus faible au cours de la phase d'accélération ou de propulsion vers l'avant. L'étude 1 de cette thèse, qui analysera la variabilité inter-individuelle de la trajectoire du CoM chez des serveurs experts aura pour objectif de valider cette hypothèse.

Brito et al. (2024) ont aussi comparé les différences cinématiques entre des joueurs présentant une vitesse de service élevée (155,0 ± 9,4 km · h^{-1}) et ceux avec une vitesse plus faible (129,5 ± 10,6 km · h^{-1}). Les joueurs servant plus fort se distinguaient par un déplacement vertical du CoM vers le haut plus important uniquement en fin de phase d'armée (Figure 2.8). Les déplacements verticaux et horizontaux du CoM pour les autres phases du service (préparation, mise en charge, début et milieu de la phase d'armée, accompagnement) étaient similaires entre les deux groupes, amenant à penser que les déplacements verticaux et horizontaux du CoM ne sont pas corrélés à la vitesse de balle. **Cette supposition devra toutefois être confirmée dans l'étude 1 de cette thèse**.

2.4.4 Rotation du tronc autour de l'axe longitudinal

La rotation longitudinale du tronc dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, également appelée « dévissage » par les entraîneurs de tennis (Figure 2.6.C), désigne la rotation du tronc vers la gauche chez le joueur droitier. Cette action de « dévissage »

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

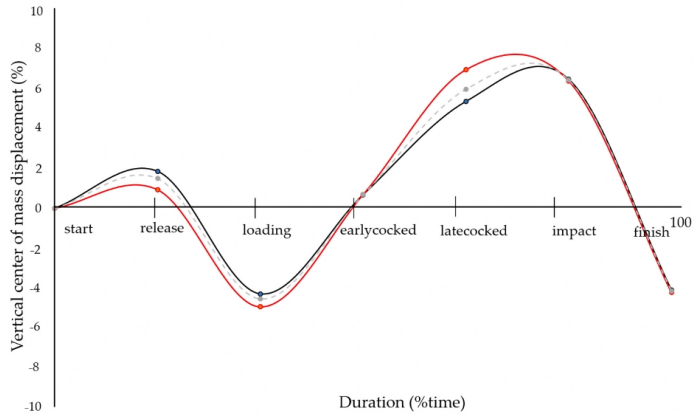


FIGURE 2.8 – Trajectoire verticale du CoM, exprimée en pourcentage par rapport à sa position initiale. Les joueurs ayant une vitesse de service élevée sont représentés en rouge, ceux avec une vitesse plus faible en noir, tandis que la moyenne des deux groupes est illustrée par une courbe grise en pointillés, d'après Brito et al. (2024).

s'effectue à des vitesses très élevées pouvant dépasser $800° \cdot s^{-1}$ chez les joueurs de haut niveau (Elliott et al., 1986 ; Fleisig et al., 2003 ; Kibler, 1995 ; Van Trigt et al., 2025 ; Whiteside et al., 2013b). Selon les estimations de Gordon et Dapena (2006), environ 40 % de la vitesse de la raquette mesurée à 0,09 s avant l'impact résulte de la rotation longitudinale du tronc au début de la phase d'accélération. Par ailleurs, Van Trigt et al. (2025) ont démontré une régression significative entre la vitesse de balle et la vitesse maximale de rotation longitudinale du tronc (mesurée grâce à des capteurs inertiels) chez huit joueurs professionnels. Selon les résultats de cette étude, une augmentation de $181° \cdot s^{-1}$ de la vitesse angulaire du tronc lors du premier service permettrait une augmentation de $10 \text{ km} \cdot h^{-1}$ de la vitesse de la balle. De plus, une corrélation significative entre la vitesse maximale de rotation longitudinale du tronc et le pourcentage de réussite au service a été observée. À la lumière de ces résultats, on pourrait s'attendre à ce que la vitesse de la rotation longitudinale augmente avec l'expertise et l'âge des joueurs. Pourtant, Whiteside et al. (2013b) n'ont obtenu aucune différence significative pour cette mesure entre des joueuses professionnelles et des jeunes joueuses espoirs. De manière similaire, Touzard (2021) n'a pas observé de différences significatives entre trois groupes de joueuses élites d'âge et de niveaux différents.

Au-delà de la quantification de la vitesse de rotation longitudinale du tronc, la prise en compte du timing d'atteinte des vitesses maximales de rotation longitudinale des hanches et des épaules apparaît comme un élément fondamental pour la compréhension du trans-

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

fert d'énergie au cours du service. Néanmoins, les résultats rapportés dans la littérature à ce sujet demeurent contrastés. D'un côté, Martin, Kulpa, Ropars et al. (2013) et Wagner et al. (2014) ont observé une séquence proximo-distale au niveau du tronc avec une vitesse maximale de rotation longitudinale des hanches qui précède celle du haut du torse chez des joueurs experts. D'un autre côté, les travaux de Van Trigt et al. (2025) et de (Fleisig et al., 2003) ont remis en question l'existence de cette séquence proximo-distale. Ils ont rapporté que les joueurs professionnels atteignaient la vitesse maximale de rotation longitudinale des épaules en moyenne 10 à 28 ms avant celle des hanches. En résumé, la contribution de la rotation longitudinale du tronc à la vitesse de la balle reste encore mal comprise. Les divergences que nous venons de pointer soulignent la nécessité de mener des investigations complémentaires visant à préciser les rôles respectifs des rotations longitudinales du tronc, des hanches et des épaules, leur organisation temporelle, ainsi que les stratégies motrices mises en œuvre par les joueurs de haut niveau pour générer des vitesses de balle élevées. **L'analyse de ces différents aspects constituera l'objet du chapitre 6 cette thèse**.

2.4.5 Angle de séparation

Chez un joueur droitier, la phase précédant l'action de « dévissage » est caractérisée par une rotation des hanches et des épaules vers la droite autour de l'axe longitudinal, communément désignée comme une phase de « vissage », accompagnée d'une bascule du tronc vers l'arrière autour de l'axe transverse (Elliott, 2006). Généralement, la rotation longitudinale des épaules vers la droite est plus marquée que celle des hanches, ce qui entraîne l'apparition d'un angle de séparation, défini comme l'angle formé entre la ligne des épaules et celle des hanches dans le plan transversal (Figure 2.9). Cette dissociation entraîne une activation plus importante du muscle érecteur du rachis ipsilatéral par rapport à l'érecteur du rachis controlatéral (J. Chow et al., 2009 ; McGill, 1992).

Les travaux portant sur le service ont rapporté des angles de séparation maximaux compris entre 4° et 30° (Reid & Giblin, 2015 ; Tubez et al., 2021 ; Whiteside et al., 2013a, 2013b). Ces résultats suggèrent une variabilité inter-individuelle importante concernant le mouvement de dissociation du tronc, y compris chez les professionnels, pourtant souvent pris en exemple comme modèles par les entraîneurs de tennis (Schonborn, 2002). Alors que Whiteside et al. (2013b) ont observé que cet angle de séparation maximal diminue significativement avec l'âge et l'expertise (30 ± 7° chez des jeunes joueuses de tennis de moins de 12 ans *vs.* 17 ± 11° chez des joueuses professionnelles adultes), Tubez et al.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

(2021) n'ont observé aucune différence significative entre trois groupes de serveurs d'âges et de niveaux différents (jeunes : $4 \pm 10°$, juniors : $9 \pm 14°$, professionnels : $15 \pm 10°$). Cette forte variabilité inter-individuelle de l'angle de séparation a aussi été mise en évidence lors du swing de golf (Smith et al., 2015). **Nous chercherons à la caractériser de façon précise pour le service des joueurs de tennis élite dans l'étude 3 de cette thèse**.

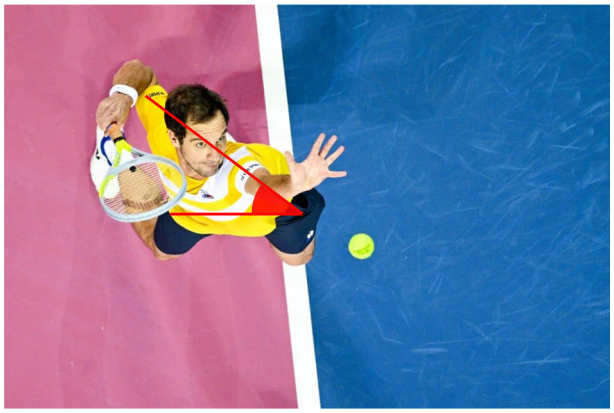


FIGURE 2.9 – Angle de séparation entre la ligne des épaules et celle des hanches dans le plan transverse au moment de l'armée

Bien que l'angle de séparation au service soit reconnu par les entraîneurs de tennis, novices et experts, comme un paramètre déterminant du transfert d'énergie et de la production de vitesse, il a cependant reçu moins d'attention dans la littérature scientifique que celui mesuré pour les frappes de fond de court (cout droit et revers). Par conséquent, son impact sur la performance reste encore mal compris (Elliott, 2006 ; Landlinger et al., 2010). Dans d'autres sports comme le badminton, le golf ou le baseball, il est admis que l'angle de séparation permet la mise en tension des muscles du tronc, le stockage et la restitution de l'énergie élastique (Bullock et al., 2020 ; J. Myers et al., 2008 ; Zhang et al., 2016 ; Zheng et al., 2008). Il est perçu comme un facteur incontournable de la performance en favorisant l'augmentation de la vitesse de rotation longitudinale lors du dévissage, et par conséquent, la vitesse du smash, du pitch ou du swing. À notre connaissance, aucune étude n'a établi de lien entre l'angle de séparation maximal et la performance du service au tennis. **Nous nous pencherons sur cette relation dans l'étude 3 de cette thèse**. De plus, les stratégies motrices des joueurs de tennis quant à l'évolution temporelle de ce paramètre au cours du service restent méconnues. **Ces points seront abordés dans l'étude 4 de cette thèse**.

L'existence d'une variabilité inter-individuelle concernant certains paramètres du ser-

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

vice au tennis soulève la question de son origine. Une première piste explicative consiste à s'intéresser aux caractéristiques propres aux joueurs, susceptibles d'influencer à la fois la performance et l'organisation du mouvement. Des paramètres tels que les caractéristiques anthropométriques, les qualités physiques, la latéralité ou encore le sexe ont en effet été étudiés ou avancés dans la littérature pour expliquer les différences de performance. Ils peuvent aussi fournir des éléments indirects pour comprendre l'origine de la variabilité inter-individuelle.

2.5 Influence des caractéristiques individuelles sur la performance et la biomécanique du service

2.5.1 Influence des paramètres anthropométriques

Les paramètres anthropométriques, tels que la taille, le poids et l'indice de masse corporelle (IMC) exercent un impact significatif sur la performance au service (Baiget et al., 2022 ; Bonato et al., 2014 ; Bozděch et al., 2024 ; Colomar, Corbi, Brich & Baiget, 2022 ; Fett et al., 2020 ; Palmer et al., 2018 ; Vaverka & Cernosek, 2013 ; Wong et al., 2014).

Le Tableau 2.6 présente les corrélations rapportées dans la littérature scientifique entre ces paramètres et la vitesse de balle au service. Si la force des corrélations varie en fonction du sexe et du niveau de jeu, l'ensemble des études convergent pour montrer que ce sont les joueurs les plus grands et les plus lourds qui génèrent les services les plus rapides. Baiget et al. (2022) ont estimé que les paramètres anthropométriques expliquent entre 22 % et 35 % de la variation de la vitesse de balle au service. L'influence positive de la taille sur la vitesse de balle au service peut s'expliquer par une hauteur de frappe plus élevée, permettant d'agrandir la surface cible atteignable dans le carré de service adverse, d'obtenir une trajectoire plus descendante et donc d'améliorer la vitesse du service (Vaverka & Cernosek, 2013). De son côté, l'impact de la masse corporelle sur la vitesse de balle peut être appréhendé via le principe fondamental de la dynamique (masse × accélération) et la création du moment cinétique, ces deux mécanismes influençant directement la capacité du joueur à générer de la vitesse (Wong et al., 2014). Si le lien entre paramètres anthropométriques et vitesse de balle au service est bien établi dans la littérature, l'influence des paramètres anthropométriques sur les variables cinématiques et les stratégies motrices mises en œuvre au service n'a jamais été investiguée.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Étude	Population	Corrélation Taille–VS	Corrélation MC–VS	Corrélation IMC–VS
Baiget et al. (2022)	21 joueurs de tennis professionnels (945 services analysés)	– Taille corrélée à VS1 ($r = 0{,}32$) – Taille corrélée à VSF ($r = 0{,}50$)	– MC corrélée à VS1 ($r = 0{,}31$) – MC / VSF ($r = 0{,}95$)	
Bonato et al. (2014)	8 joueurs professionnels	– Taille corrélée à VS1 ($r = 0{,}78$) – Taille corrélée à VS2 ($r = 0{,}80$)	– MC pas corrélée à VS1 ($r = -0,22$) – MC pas corrélée à VS2 ($r = -0,15$)	
Fett et al. (2020)	1 019 jeunes joueurs (625 garçons, 394 filles) des catégories U12, U14, U16 et U18	– Taille corrélée à VS (r = de 0,32 à 0,52), sauf pour les filles U12 ($r = 0{,}26$)	– MC corrélée à VS (r = de 0,35 à 0,57)	– IMC corrélé à VS (r = 0,17 à 0,40), sauf pour les filles U18 ($r = 0{,}12$)
Hayes et al. (2021)	12 joueurs professionnels et 9 joueuses professionnelles	– Taille corrélée à VS ($r = 0{,}80$)	– MC corrélée à VS ($r = 0{,}68$)	– IMC pas corrélé à VS ($r = 0{,}31$)
Palmer et al. (2018)	42 joueurs professionnels	– Taille corrélée à VS ($r = 0{,}43$)		
Vaverka et Cernosek (2013)	78–84 joueurs professionnels et 71–85 joueuses professionnelles	– Taille corrélée à VS1 et VSF ($r = 0{,}48$ à $0{,}63$)		

TABLE 2.6 – Corrélations significatives ($p < 0{,}05$) entre les paramètres anthropométriques et la vitesse de la balle au service. MC : masse corporelle ; IMC : indice de masse corporelle ; U12 : moins de 12 ans ; U14 : moins de 14 ans ; U16 : moins de 16 ans ; U18 : moins de 18 ans ; VS : vitesse du service ; VSF : vitesse des services les plus rapides ; VS1 : vitesse du premier service ; VS2 : vitesse du second service.

2.5.2 Influence des qualités physiques

L'influence des qualités physiques sur la performance au service a également fait l'objet de nombreuses études (Tableau 2.7). Un consensus semble se dégager quant au rôle déterminant de la force dans la production de la vitesse au service (Baiget et al., 2016 ; Cohen et al., 1994 ; Colomar, Corbi, Brich & Baiget, 2022 ; Fernandez-Fernandez et al., 2019). Dans une étude de Baiget et al. (2016), des analyses de régression multiple ont été menées pour évaluer si le niveau de force isométrique maximale, mesuré lors de différents mouvements articulaires (extension des genoux et du dos, flexion et extension du poignet et du coude, flexion, extension et rotation interne et externe de l'épaule), pouvait prédire la vitesse de service. Les résultats ont montré qu'environ 55 % de la variance de la vitesse de service pouvait être expliquée par la combinaison des forces maximales isométriques de flexion et de rotation interne de l'épaule. En revanche, la force isométrique maximale mesurée lors de l'extension des genoux semble jouer un rôle plus limité dans la production de vitesse au service, avec une contribution plus faible que celle observée pour les membres supérieurs (Colomar, Corbi & Baiget, 2022 ; Colomar, Corbi, Brich & Baiget, 2022 ; Hayes et al., 2021 ; Palmer et al., 2018). Enfin, si Hayes et al. (2021) ont observé une relation positive et significative entre la hauteur de saut mesurée lors d'un counter movement jump et la vitesse de balle au service, Pugh et al. (2003) n'ont trouvé aucune relation entre la force maximale isocinétique d'extension des genoux et la vitesse du service.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Études	Population	Corrélation significative avec la vitesse de balle
Baiget et al. (2016)	12 joueurs juniors compétitifs	– Force isométrique maximale lors de la rotation interne de l'épaule (r = 0,67)
Palmer et al. (2018)	42 joueurs universitaires	– Amplitude articulaire de rotation externe de la hanche ($r = 0{,}39$) – Distance du saut sur une jambe ipsilatérale ($r = 0{,}36$) – Distance du saut sur une jambe controlatérale ($r = 0{,}31$) – Distance atteinte au lancer de poids assis avec le bras dominant ($r = 0{,}30$)
Fett et al. (2020)	1 019 joueurs (625 garçons, 394 filles) de catégories U12, U14, U16 et U18	Chez les garçons : – Force de préhension ($r = 0{,}43$ à $0{,}63$) – Distance atteinte aux lancers de médecine ball (2 kg) au-dessus de la tête et sur les côtés ($r = 0{,}49$ à $0{,}63$) Chez les filles : – Force de préhension ($r = 0{,}20$ à $0{,}60$) – Distance atteinte aux lancer de médecine ball (2 kg) au-dessus de la tête et sur les côtés ($r = 0{,}20$ à $0{,}60$)
Hayes et al. (2021)	21 joueurs juniors (12 garçons, 9 filles)	– Force maximale isométrique produite lors de « l'isometric mid-thigh pull » (IMTP) ($r = 0{,}87$) – Forces isométriques produites lors de l'IMPT à 300 ms ($r = 0{,}71$), 200 ms ($r = 0{,}58$) et 100 ms ($r = 0{,}64$) – Hauteur de saut au CMJ ($r = 0{,}77$)
Colomar et al. (2020)	21 joueurs juniors	– Raideur du gastrocnémien ($r = 0{,}45$) – Raideur de l'infra-épineux ($r = 0{,}42$)
Fernandez-Fernandez et al. (2019)	128 jeunes joueurs (68 garçons, 60 filles)	– Distance atteinte aux lancers de médecine ball (2 kg) au-dessus de la tête et sur les côtés ($r = 0{,}41$ à $0{,}64$)
Cohen et al. (1994)	40 joueurs compétitifs	– Force maximale isocinétique lors d'extension du coude ($r = 0{,}48$) – Amplitude articulaire de flexion du poignet dominant ($r = 0{,}34$) – Amplitude articulaire de rotation interne de l'épaule ($r = 0{,}32$) – Force maximale isocinétique lors de rotation interne de l'épaule à $60° \cdot s^{-1}$ et $180° \cdot s^{-1}$ ($r = 0{,}31$ à $0{,}37$)

TABLE 2.7 – Corrélations significatives ($p < 0{,}05$) obtenues entre les tests ou les qualités physiques et la vitesse de balle au service. U12 : moins de 12 ans ; U14 : moins de 14 ans ; U16 : moins de 16 ans ; U18 : moins de 18 ans ; CMJ : *Counter Movement Jump* ; IMTP : *Isometric Mid-Thigh Pull*.

Les lancers de médecine ball (depuis la position assise, en style « shot put ou lancer de poids » ou en lancer latéral type « passe de rugby ») sont des tests couramment utilisés dans le tennis pour mesurer la puissance explosive du tronc et du haut du corps. Ces tests présentent un intérêt particulier pour les joueurs de tennis en raison de leur forte validité externe, liée à leur capacité à reproduire des mouvements impliquant la coordination de la chaîne cinématique (Elliott, 2006 ; Fernandez-Fernandez et al., 2014). Plusieurs études (Tableau 2.7) ont mis en évidence des relations significatives entre les performances aux lancers de médecine ball et la vitesse de balle au service, avec notamment une corrélation très forte pour le lancer de type shot put ($r = 0{,}93$) chez des joueurs nationaux et professionnels (Sánchez-Pay et al., 2021), ainsi que des corrélations significatives pour le lancer latéral (*side medicine-ball throw*) chez des joueurs élite juniors (Fett et al., 2020). Par ailleurs, des similitudes cinématiques entre le lancer au-dessus de la tête à bras cassé et le service ont été observées chez des joueuses expertes, bien que les corrélations demeurent modestes pour l'angle maximal de séparation hanches/épaules et la vitesse maximale de rotation longitudinale du tronc (Reid et al., 2015). Ces résultats suggèrent que la puissance développée par le tronc et le haut du corps lors de ces lancers constitue une qualité physique déterminante pour la performance au service. Par ailleurs, cette qualité apparaît d'autant plus importante avec l'avancée en âge, car elle constitue l'un des meilleurs prédicteurs de la vitesse du service (Fett et al., 2020).

Au-delà des qualités de force et de puissance, quelques recherches se sont consacrées à l'évaluation des amplitudes de mouvement articulaire et à leur influence sur la performance au service. Si le lien entre souplesse d'épaule (en rotation interne et externe) et vitesse de balle au service a été fortement investigué (Cohen et al., 1994 ; Moreno-Pérez et al., 2018 ; Moreno-Pérez et al., 2019 ; Palmer et al., 2018), les études portant sur la souplesse et la mobilité rotationnelle du tronc et les capacités de dissociation entre les hanches et les épaules sont plus limitées (Campbell et al., 2013 ; Palmer et al., 2018). Les travaux existants ne mettent pas en évidence de relation claire entre les amplitudes maximales de rotation du tronc mesurées lors de tests fonctionnels et la performance au service. En particulier, Palmer et al. (2018) n'ont observé aucune corrélation significative entre l'amplitude maximale de rotation longitudinale du tronc évaluée à l'aide du «Seated Trunk Rotation Test » et la vitesse de balle au service chez des joueurs experts. De leur côté, Campbell et al. (2013) ont montré que les joueurs, juniors avec ou sans douleur lombaire, mobilisaient des amplitudes de rotation du tronc proches de leurs valeurs maximales lors des phases de préparation et d'accélération du service, suggérant une possible correspon-

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

dance entre les amplitudes mesurées en test et celles exprimées en situation spécifique de service. Toutefois, ces résultats restent indirects et ne permettent pas de conclure quant à l'influence des capacités de rotation du tronc sur la cinématique du service. À ce jour, aucune étude n'a examiné de manière spécifique les relations entre les capacités de rotation du tronc évaluées hors situation sportive et les paramètres cinématiques du service. C'est dans cette perspective que s'inscrit l'étude 5 de cette thèse, dont l'objectif est d'explorer les liens entre les capacités de rotation du tronc et les stratégies cinématiques mises en œuvre au service chez des joueurs de tennis.

2.5.3 Influence de la latéralité

2.5.3.1 Influence de la latéralité manuelle

La latéralité est définie comme toute asymétrie fonctionnelle entre les côtés droit et gauche du corps (Kertesz et al., 1992) et se manifeste par l'utilisation préférentielle d'une partie du corps par rapport à son côté symétrique (Moreno et al., 2022). La latéralité manuelle correspond plus spécifiquement à la préférence d'une main par rapport à l'autre dans les tâches uni-manuelles (Scharoun & Bryden, 2014). En tennis, elle renvoie à la main préférentielle utilisée pour tenir la raquette et exécuter les frappes, et a principalement été analysée sous l'angle stratégique. Bien que les gauchers représentent environ 10 % de la population masculine générale, ils constituent près de 15 % des 100 meilleurs joueurs de tennis professionnels masculins entre 1985 et 2016, suggérant une surreprésentation à ce niveau de pratique (Bačić & Ghazala, 2024). Cet avantage relatif pourrait s'expliquer en partie par des facteurs stratégiques et par des effets de fréquence perceptive, liés à une exposition plus fréquente aux joueurs droitiers, facilitant la lecture et l'anticipation du jeu, notamment dans les situations de service-retour (Hagemann, 2009). A ce titre, une analyse de 5 035 échanges issus de 32 matchs de tennis professionnels masculins lors de tournois du Grand Chelem a démontré que le service d'un gaucher ne constitue pas simplement le reflet inverse de celui d'un droitier (Loffing et al., 2009). En effet, des différences stratégiques significatives entre droitiers et gauchers ont été observées au niveau des zones jouées au service et des angles de trajectoire latérale de la balle.

2.5.3.2 Influence de la latéralité oculo-manuelle

La latéralité ne se limite pas à la main dominante, mais s'exprime aussi au niveau oculaire. La dominance oculaire peut prendre trois formes différentes (Coren & Kaplan,

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

1973 ; Walls, 1951) : il peut s'agir de l'œil privilégié pour viser un objet (on parle de « *sighting eye* » ou de dominance oculaire d'alignement), de l'œil présentant la meilleure acuité visuelle ou sensibilité au contraste (dominance oculaire d'acuité), ou encore de l'œil qui s'impose dans une situation de rivalité binoculaire lorsque des stimulations visuelles divergentes sont fournis à chaque oeil (dominance sensorielle). Parmi ces approches, c'est généralement la définition fondée sur la dominance oculaire d'alignement (visée) qui est retenue dans la littérature scientifique (Mapp et al., 2003 ; Porac & Coren, 1976). On parle de « dominance oculaire » ou « d'œil directeur » ou « d'œil dominant » pour caractériser l'utilisation privilégiée d'un œil par rapport à l'autre (Moreno et al., 2022). Sur le plan physiologique, Coren et Kaplan (1973) ont défini la dominance oculaire comme résultant d'une prééminence fonctionnelle ou d'une activité préférentielle d'un œil au sein de la paire binoculaire. Il a été démontré que la stimulation visuelle de l'œil dominant entraîne une activation plus forte du cortex visuel primaire, comparée à celle de l'œil non dominant (Rombouts et al., 1996). De plus, Vergilino-Perez et al. (2012) ont mis en évidence que l'œil dominant confère un avantage en termes d'attention visuo-spatiale, se traduisant par des saccades oculaires plus rapides et plus précises vers des cibles visuelles.

Quand on combine la latéralité manuelle et la latéralité oculaire d'une personne, il est possible de définir sa latéralité oculo-manuelle. Cette latéralité est importante pour les activités qui nécessitent la coordination des yeux (en tant qu'organes récepteurs) et des membres (en tant qu'organes effecteurs) afin d'effectuer une réponse motrice précise (Azémar et al., 2008 ; Moreno et al., 2022). Il existe deux types de latéralité oculo-manuelle : la latéralité oculo-manuelle homogène, lorsque l'œil directeur et la main dominante se trouvent du même côté et la latéralité oculo-manuelle croisée, lorsque l'œil directeur est du côté opposé à la main dominante. Cette distinction suggère l'implication de circuits neuronaux différents reliant l'œil et la main (Azémar et al., 2008).

Des études ont estimé que la majorité de la population présente une latéralité oculo-manuelle homogène alors que la latéralité oculo-manuelle croisée ne concerne qu'un tiers des personnes (Bourassa, 1996 ; Robison et al., 1999). Une revue systématique menée par Moreno et al. (2022) s'est intéressée à la répartition des profils de latéralité oculo-manuelle chez les athlètes de haut niveau dans différents sports. Leurs résultats ont révélé une surreprésentation des profils de latéralité oculo-manuelle croisée dans des disciplines telles que le golf (53 %), le football (53 %) et les sports collectifs (51 %), suggérant un potentiel avantage en termes de performance sportive. Cette tendance a également été observée en tennis avec 42 % de joueurs de haut niveau présentant une latéralité oculo-manuelle

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

croisée. Au-delà de l'estimation du pourcentage de profils « homogènes » et « croisés » dans des populations sportives expertes, plusieurs études se sont intéressées aux effets biomécaniques de la latéralité oculo-manuelle lors de mouvements sportifs. Ainsi, Lopez-Diaz et al. (2015) ont comparé la biomécanique du tir au basket chez 34 jeunes basketteurs de niveau régional en fonction de leur latéralité oculo-manuelle. Les résultats montrent que les joueurs homogènes adoptent une technique de tir au panier différente (avec une rotation du corps à 45°) par rapport aux joueurs croisés, leur permettant d'obtenir des pourcentages de réussite plus élevés. En golf, l'étude Sugiyama et Lee (2005) a montré que chez des golfeurs débutants avec un œil droit dominant réussissaient significativement plus de putts lorsqu'ils utilisaient la posture « main droite » plutôt que la posture « main gauche », et à l'inverse, les sujets avec l'œil gauche dominant avaient de meilleures performances avec la posture « main gauche » qu'avec la posture « main droite ».

En tennis, des travaux préliminaires ont montré que la latéralité oculo-manuelle influence la performance et certains aspects techniques du coup droit, notamment le plan de frappe et la prise de raquette (Triolet, 2019 ; Vicencio, 2014). Ils ont également révélé un avantage en termes de vitesse de balle chez les joueurs « croisés » alors que les joueurs « homogènes » seraient plus précis. Concernant le service, la latéralité oculo-manuelle pourrait avoir une influence sur la biomécanique, dans la mesure où le contact visuel avec la balle lors du lancer coïncide avec la nécessité d'ajuster sa position en fonction de la diagonale ciblée. Cette particularité pourrait ainsi induire des adaptations techniques spécifiques qui ont fait l'objet d'hypothèses dans des publications pédagogiques et didactiques. Sur la base d'observations, Garipuy et Wolff (1999) ont rapporté des adaptations de la technique de frappe en tennis en fonction de la latéralité oculo-manuelle. Par exemple, dans la diagonale des égalités, les joueurs « homogènes » serviraient dans une position plus frontale que les joueurs « croisés ». D'après eux, les positions de l'œil dominant (entrée perceptive) et de la main qui tient la raquette (sortie motrice) doivent coïncider sur le plan latéral à l'approche du point d'impact avec la balle, amenant le joueur à ajuster naturellement sa position en fonction de ces deux éléments. De son côté, Dorochenko (2013) a émis l'hypothèse selon laquelle les joueurs « croisés » lanceraient davantage la balle sur leur gauche quand ils sont droitiers alors que la latéralité oculo-manuelle homogène induirait un lancer de balle plus à droite chez les droitiers. Cependant, aucune étude scientifique n'a confirmé ces hypothèses pour le moment. À ce jour, seuls les travaux de Ziagkas et al. (2017) et Mavvidis et al. (2018) se sont penchés sur l'influence de la latéralité oculo-manuelle sur la performance au tennis chez des joueurs profession-

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

nels et amateurs. Leurs résultats ne montrent pas de différence significative en termes de précision pour la 1re balle de service, mais suggèrent une tendance favorable aux joueurs « croisés » uniquement dans la diagonale des égalités. Toutefois, ces études présentent des limites méthodologiques, notamment en ce qui concerne la détermination de la latéralité oculaire. À ce jour, aucun travail n'a étudié l'influence de la latéralité oculo-manuelle sur les paramètres cinématiques du service, tout en s'intéressant à des populations de joueurs experts. **Nous nous intéresserons à cette problématique dans l'étude 6 de cette thèse**.

2.5.4 Influence du sexe

Plusieurs études se sont intéressées aux différences entre hommes et femmes dans l'exécution du service. Sur le plan de la performance, il existe des écarts de vitesse de balle entre hommes et femmes. Ainsi, les vitesses moyennes de 1er service enregistrées lors des tournois du Grand Chelem 2008, 2012 et 2016 avoisinaient 185 ± 10 km · h^{-1} chez les hommes et 155 ± 10 km · h^{-1} chez les femmes (Vaverka & Cernosek, 2016). Ces différences se retrouvent aussi au niveau de la vitesse maximale résultante de la tête de raquette, avec des valeurs moyennes de 50 m · s^{-1} pour les hommes contre 43 m · s^{-1} pour les femmes (Elliott et al., 2013). Ces disparités entre les sexes peuvent être attribuées à des différences anthropométriques et physiologiques, notamment en termes de force et de puissance musculaire (Roetert et al., 1996 ; Verlinden et al., 2004). Toutefois, il semblerait que la vitesse du service ait un impact plus important sur la performance en tennis féminin qu'en tennis masculin. En effet, Brown (2021) a mis en évidence une corrélation significativement plus forte entre la vitesse du service et le pourcentage de points gagnés chez les femmes que chez les hommes.

Sur le plan biomécanique, Elliott et al. (2013) ont comparé le service de 8 joueuses professionnelles à celui de leurs homologues masculins. La hauteur d'impact relative, c'est à dire rapportée à la taille des joueurs, était similaire entre hommes et femmes (correspondant à 1,5 ± 0,04 fois la taille). En revanche, les joueurs masculins frappaient la balle plus à l'intérieur du terrain (H : 78 ± 18 cm *vs.* F : 61 cm ± 5 cm). Au niveau des membres inférieurs, les hommes présentaient une flexion plus importante du genou avant (H : 75° ± 17° *vs.* F : 69 ± 8°), tandis que les femmes fléchissaient davantage le genou arrière (F : 88 ± 8° *vs.* H : 80 ± 7°) et démontraient une vitesse verticale de la hanche arrière plus élevée (F : 2,3 ± 0,1 m · s^{-1} *vs.* H : 2,1 ± 0,3 m · s^{-1}). Concernant le tronc, les joueurs avaient un angle de séparation plus marqué entre la ligne des épaules et la ligne des hanches dans le

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

plan transverse (H : 25° *vs.* F : 17 ± 11°) ainsi qu'une vitesse de rotation longitudinale du tronc plus importante (H : 870 ± 120° · s^{-1} *vs.* F : 715 ± 145° · s^{-1}) que les joueuses. Si l'angle maximal de rotation externe de l'épaule était comparable entre les sexes (F : 141 ± 7°, H : 135 ± 12°), les joueurs produisaient une vitesse maximale de rotation interne de l'épaule significativement supérieure aux joueuses (H : 2 420 ± 590° · s^{-1} *vs.* F : 2 000 ± 297° · s^{-1}). Bien que les vitesses d'extension du coude et de flexion du poignet ne différaient pas significativement entre hommes et femmes, la vitesse de rotation interne de l'épaule semblait être le principal facteur expliquant l'écart de vitesse de balle au service entre les sexes. Dans son travail de thèse, Touzard (2021) s'est intéressé à l'influence du sexe sur différents paramètres cinématiques du service chez les joueurs et joueuses de plus de 16 ans (12 filles et 10 garçons). Ses résultats ont montré que les garçons étaient significativement plus grands (+16 cm) et plus lourds (+15,4 kg) que les filles. Ils servaient significativement plus fort et démontraient des vitesses maximales de flexion du poignet et d'extension du coude significativement supérieures. La position d'impact de la balle était significativement plus à gauche et plus avancée chez les garçons. La vitesse maximale de rotation interne de l'épaule tendait également à être plus élevée chez ces derniers. Aucune différence significative n'a été observée concernant les vitesses maximales de rotation longitudinale des hanches et des épaules, ni pour l'angle de séparation mesuré au moment de l'ARM. Le seul paramètre mesuré au niveau des membres inférieurs, à savoir la vitesse maximale verticale de la hanche arrière permettant d'appréhender la qualité de poussée des jambes, ne différait pas significativement entre garçons et filles. Dans les études 1 à 5 de cette thèse, nous nous intéressons uniquement aux joueurs experts masculins, présents en plus grand nombre dans la base de données du laboratoire M2S. En raison des différences cinématiques susceptibles d'exister entre les deux sexes. Ce choix permet d'assurer une plus grande homogénéité au niveau des échantillons analysés et d'éviter la variabilité liée aux différences biomécaniques entre hommes et femmes.

Si les caractéristiques individuelles telles que les paramètres anthropométriques, les qualités physiques ou le sexe permettent d'identifier certains facteurs associés à la performance et à la cinématique gestuelle, elles ne suffisent toutefois pas à expliquer la production d'une organisation motrice efficace chez les joueurs de tennis experts. En effet, dans d'autres sports, il a été mis en avant que des sportifs présentant des caractéristiques similaires peuvent adopter des stratégies motrices différentes, tandis que des profils distincts peuvent aboutir à des niveaux de performance comparables. Comprendre l'existence et le rôle de la variabilité inter-individuelle, l'émergence des stratégies motrices et comment

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

les entraîneurs peuvent enseigner le geste du service nécessite de s'appuyer sur des cadres théoriques du contrôle et de l'apprentissage moteur.

2.6 Théories du contrôle et de l'apprentissage moteur : prescription versus émergence

Depuis de nombreuses années, la recherche portant sur le contrôle et l'apprentissage moteur s'est structurée autour de deux grands courants théoriques opposés. D'un côté, les approches cognitivistes postulent que l'action motrice est le résultat d'un traitement centralisé de l'information par le système nerveux, reposant sur des représentations internes et des programmes moteurs stockés en mémoire. De l'autre, les approches dites dynamiques mettent l'accent sur les processus d'auto-organisation permettant l'émergence spontanée de coordinations motrices qui s'adaptent aux contraintes imposées par la tâche, l'environnement et l'organisme. Dans cette perspective, les actions motrices ne sont plus le résultat de plans préétablis, mais des réponses adaptatives, façonnées par l'interaction permanente entre l'organisme et son environnement.

2.6.1 Théories cognitivistes : le mouvement comme produit de programmes internes

En règle générale, les théories cognitivistes considèrent que le mouvement est gouverné par des représentations internes stockées en mémoire, appelées programmes moteurs, connaissances ou schémas. Ces représentations fonctionnent comme des plans d'action, permettant à l'individu de planifier, d'organiser et de corriger ses mouvements (Schmidt & Lee, 2011 ; Whiting et al., 1992). En d'autres termes, le mouvement est guidé par un ensemble d'instructions préétablies, organisées à l'avance, qui permettent de sélectionner les groupes musculaires appropriés et de réguler l'intensité et le timing de leur contraction et de leur relâchement. Il est à noter que ces programmes sont préparés avant même le déclenchement de la réponse motrice, ce qui permet l'exécution du mouvement de manière indépendante par rapport aux retours sensoriels ou aux ajustements en cours d'exécution (Keele, 1968). Ainsi, un expert se distingue par la richesse et la précision de ses programmes moteurs, plus nombreux et mieux adaptés que ceux d'un débutant (Schmidt & Lee, 2011). En effet, ces théories assimilent souvent l'organisme humain à un ordinateur : il reçoit des informations (stimulus), les traite via des étapes successives (comme

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

un logiciel), et produit une réponse motrice. Cette perspective repose sur le modèle du traitement de l'information qui postule que le cerveau traite les stimuli en suivant une succession d'étapes cognitives : l'identification du stimulus, la sélection de la réponse, puis la programmation de cette réponse (Schmidt, 1982) (Figure 2.10). Ce modèle trouve son origine dans les travaux de Fitts (1954), qui a montré que la vitesse d'exécution d'un mouvement dépend de la précision requise. Dans ses expériences, Fitts demandait aux participants de réaliser un pointage rapide avec un stylet entre deux cibles étroites et éloignées. Il observa que plus la tâche exigeait de précision, plus le temps nécessaire pour exécuter le mouvement augmentait, car une plus grande quantité d'informations devait être traitée avant et pendant le geste.

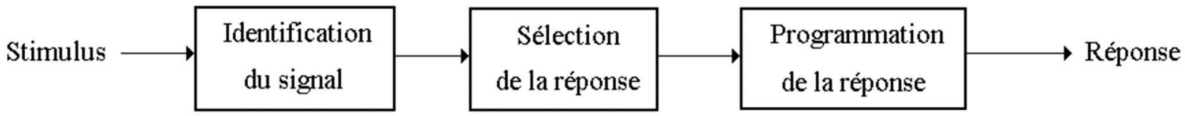


FIGURE 2.10 – Modèle simplifié du traitement de l'information, d'après Schmidt (1982)

Comme nous l'avons mentionné précédemment, ces théories suggèrent que le mouvement est guidé par un ensemble d'instructions préétablies. Une des expériences les plus convaincantes à l'appui de ces théories est celle réalisée par Wadman et al. (1979), ayant étudié l'activité électromyographique des muscles agonistes (triceps) et antagonistes (biceps) lors d'un mouvement rapide d'extension du coude. Les résultats ont montré un pattern caractéristique en trois phases : d'abord, l'activation de l'agoniste (triceps) pour initier le mouvement ; ensuite, une activation de l'antagoniste (biceps) pour ralentir le membre ; et enfin, une activation finale de l'agoniste pour stabiliser le segment en position finale (Figure 2.11). Fait surprenant : lorsque le mouvement était bloqué en position initiale, sans avertissement préalable au sujet, un pattern d'activité identique était observé. En dépit de l'absence de feedback provenant du segment, l'activité musculaire suivait un plan prédéterminé, suggérant que le mouvement était entièrement programmé à l'avance par le système nerveux. Ce résultat a renforcé l'idée selon laquelle un mouvement peut être contrôlé et exécuté selon un programme moteur préparé en amont, sans dépendre des informations sensorielles en temps réel.

Plusieurs limites de la théorie des programmes moteurs ont été avancées dans la littérature : d'une part, le problème du stockage et du rappel d'un nombre quasi infini de mouvements spécifiques, et d'autre part, le problème de la nouveauté, qui interroge la façon dont

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

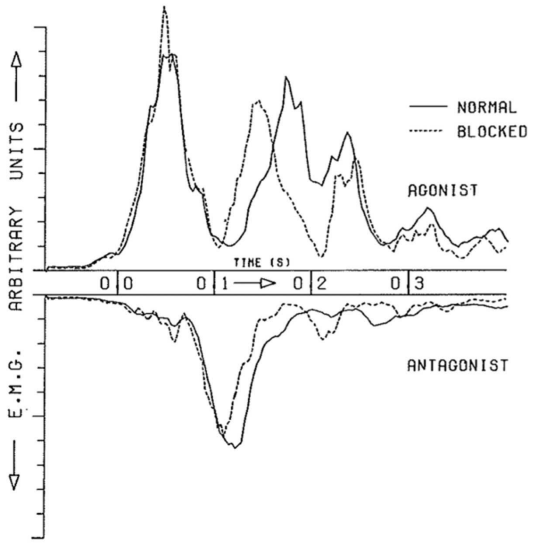


FIGURE 2.11 – Activités EMG du triceps (agoniste) et du biceps (antagoniste) lors d'un mouvement rapide d'extension du coude. Les tracés en pointillés correspondent à un mouvement mécaniquement bloqué dès le départ, sans que le sujet en soit informé, d'après Wadman et al. (1979).

l'organisme est capable de produire une réponse motrice appropriée face à une tâche totalement nouvelle (Dickinson, 1985). La théorie des schémas, proposée par Schmidt (1975), considère que la pratique et la répétition permettent d'affiner les programmes moteurs internes. Ainsi, les schémas moteurs se développent, se généralisent et deviennent plus efficaces, permettant à l'individu de s'adapter à la variabilité des situations rencontrées. De plus, le système moteur ne stockerait pas chaque mouvement de manière isolée, mais plutôt des règles générales permettant de générer des mouvements adaptés à une grande diversité de contextes (Schmidt, 1982). Ainsi, l'expérience motrice serait encodée sous forme de programmes moteurs généralisés (PMG), qui ne correspondent pas à un geste précis, mais à une catégorie de mouvements partageant une structure commune, comme les lancers ou les saisies. Ces programmes peuvent ensuite être paramétrés en fonction des afférences sensorielles reçues au cours de l'action. Autrement dit, le système utilise ces retours pour ajuster certains aspects du mouvement (comme sa durée ou son amplitude) tout en conservant une organisation centrale stable. Ces ajustements correspondent aux schémas moteurs (Figure 2.12). Par ailleurs, plus un individu est confronté à des variations d'une même classe de mouvement, plus le schéma moteur sous-jacent se renforce et se précise. La pertinence et l'efficacité des règles de paramétrisation dépendent donc directement de la quantité et de la variabilité de la pratique.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

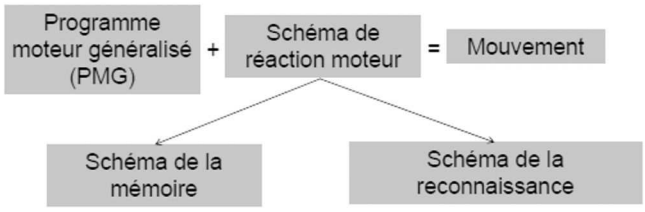


FIGURE 2.12 – Schéma simplifié de la théorie de Schmidt, d'après Schmidt (1982)

La théorie de l'apprentissage moteur d'Adams (1971), l'une des plus connues dans le domaine du contrôle moteur, repose également sur la notion de programme, mais sous une forme spécifique à chaque mouvement appris (Figure 2.13). Ce modèle, dit « en boucle fermée », accorde une place centrale au feedback sensoriel pour ajuster et affiner le geste en temps réel. Selon Adams, lorsque l'individu apprend un mouvement, il enregistre en mémoire deux types de représentations : la trace mnésique, qui correspond à une sorte de programme moteur stocké en mémoire à long terme, servant à initier et guider l'action, et la trace perceptive, qui constitue une référence sensorielle de ce que le mouvement correct devrait produire en termes de ressenti. Au cours de l'exécution, l'individu compare en continu le feedback sensoriel réel à cette trace perceptive. Si des écarts sont détectés, des ajustements sont effectués immédiatement, permettant une correction progressive de l'action. L'apprentissage passe donc par la répétition exacte du « bon mouvement », afin de renforcer ces deux traces mnésiques. Toutefois, ce modèle présente plusieurs limites qui ont été soulignées dans la littérature (Dickinson, 1985 ; Schmidt, 1982). Il accorde une place centrale au feedback sensoriel pour ajuster le mouvement en cours d'exécution, ce qui le rend peu adapté pour expliquer les actions rapides, pour lesquelles le temps disponible ne permet pas d'exploiter ces informations en temps réel. De plus, le modèle suppose l'existence de traces mnésiques spécifiques pour chaque geste et ses variations, ce qui pose un problème de stockage. Ce modèle peine également à expliquer l'apprentissage de mouvements entièrement nouveaux puisqu'il nécessite une trace perceptive préexistante comme référence.

2.6.1.1 Répercussions sur la pédagogie

Les approches cognitivistes ont des répercussions pédagogiques majeures, dans la mesure où l'apprenant est encouragé à reproduire le même geste de manière répétée. Dans cette perspective, la consistance du geste et sa répétition sont fortement valorisées et

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

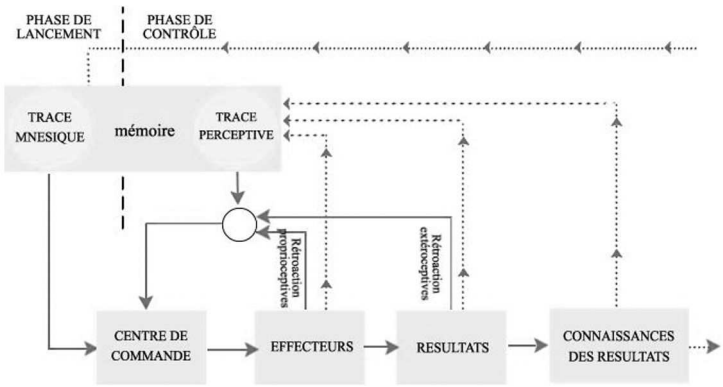


FIGURE 2.13 – Schéma récapitulatif de la théorie de « la boucle fermée », d'après Adams (1971)

considérées comme des variables centrales de l'apprentissage (Bertsch, 1995 ; Shiffrin & Schneider, 1977), car elles permettent à l'individu de converger vers une exécution stable. La répétition est perçue comme incontournable pour automatiser progressivement les nouveaux gestes chez les débutants (Delignières et al., 1997).

Les théories cognitivistes visent également à encourager la reproduction d'un « geste optimal » que les entraîneurs cherchent à transmettre en s'appuyant sur un modèle expert. Comme le souligne Famose (1998), il s'agit pour l'apprenant d'imiter et de reproduire le plus fidèlement possible le geste réalisé par un expert. La performance de l'apprenant est ensuite comparée à celle du modèle expert, et les écarts sont interprétés comme des erreurs à corriger. L'apprentissage est alors structuré autour d'un enseignement explicite et prescriptif. L'entraîneur précise quoi faire, comment le faire, et à quel moment ajuster l'action. Ces retours d'information extrinsèques, fournis avant, pendant et après l'exécution, sont conçus pour guider l'attention de l'apprenant vers les éléments techniques jugés pertinents.

2.6.2 Théories dynamiques : le mouvement comme propriété émergente

2.6.2.1 Fondements et principes des théories dynamiques

Apparues il y a une vingtaine d'années, les théories dynamiques occupent aujourd'hui une place centrale dans la recherche sur le contrôle moteur (Delignières et al., 1997). Contrairement aux approches cognitivistes, elles ne considèrent pas le mouvement comme

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

le résultat de programmes moteurs stockés en mémoire, mais comme une réponse émergente aux contraintes de la tâche, de l'environnement et/ou de l'organisme. Le système moteur humain serait structuré, dès la naissance, pour percevoir automatiquement les informations pertinentes de l'environnement, sans avoir besoin d'activer des représentations internes (programmes ou schémas).

Un tournant important a été opéré avec les travaux influents de Newell (1986) qui proposent que le mouvement humain émerge via un processus d'auto-organisation régulé par les contraintes en présence, et s'ajuste grâce à un couplage fonctionnel entre perception et action (Figure 2.14) (Davids et al., 2008).

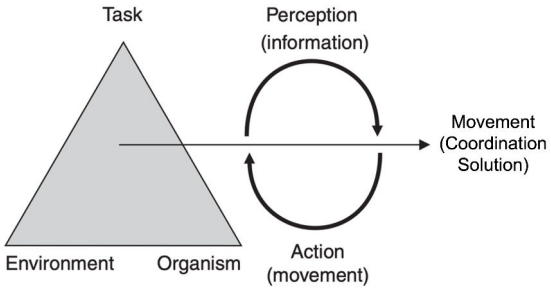


FIGURE 2.14 – Modèle simplifié de la théorie dynamique, d'après Newell (1986)

Cette idée trouve son origine dans les travaux de Bernstein (1967), pionnier de la biomécanique humaine, qui a posé le fameux problème des degrés de liberté : comment le système nerveux sélectionne-t-il une seule solution motrice parmi une infinité de possibilités ? La notion d'auto-organisation a été proposée pour résoudre ce problème : le système moteur n'impose pas une commande centrale stricte, mais laisse les différentes composantes s'auto-organiser sous l'effet de contraintes permettant l'émergence de structures coordinatives optimisant la performance et minimisant le coût énergétique. Comme l'a souligné Wilke (1977), « l'auto-organisation fait appel à des structures coordinatives, guidées par les contraintes, qui deviennent coordonnées de manière variée afin d'atteindre une performance optimale avec un coût énergétique minimal ». Bernstein fut également l'un des premiers à valoriser les variabilités intra et inter-individuelle, en les considérant non pas comme une erreur, mais comme une propriété fonctionnelle du système.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

2.6.2.2 L'importance des contraintes dans la théorie dynamique

Selon les théories dynamiques, le comportement du système peut être décrit par des paramètres d'ordre, c'est-à-dire des variables collectives qui reflètent la coordination globale des composants (par exemple : le décalage de phase entre deux segments). Sous l'influence des contraintes, le système adopte des comportements préférentiels ou naturels, appelés attracteurs. Ces attracteurs sont des états stables du système, vers lesquels il tend spontanément en raison de sa dynamique intrinsèque. À l'inverse, certains facteurs peuvent faire évoluer cette coordination : ce sont les paramètres de contrôle, qui, sans être directement liés à la structure du mouvement, induisent des transitions (par exemple : la vitesse ou la fréquence). Cette approche a été étayée par l'étude emblématique de Hoyt et Taylor (1981) ayant observé que des chevaux trottant sur un tapis roulant changent spontanément de mode de locomotion (marche, trot, galop) en fonction de la vitesse du tapis. Ces transitions motrices émergentes sont interprétées comme des changements de patrons de coordination induits par les contraintes, ici la vitesse, permettant d'optimiser l'économie d'énergie et de réduire les chocs.

Dans ce cadre théorique, il est important de préciser la nature des contraintes impliquées dans l'organisation du mouvement. Newell (1986) distingue ainsi trois grandes catégories de contraintes :

1. Les contraintes de l'organisme qui regroupent les caractéristiques propres à l'individu. Elles peuvent être structurelles (taille, poids, longueur des segments, raideur musculo-tendineuse...) ou fonctionnelles (capacités énergétiques, force musculaire, coordination, mais aussi motivation, émotion ou intention). Le sexe, par exemple, peut être considéré comme une contrainte organismique à travers ses implications anthropométriques. Les travaux de Holt et al. (1990) illustrent les contraintes de l'organisme en montrant que la fréquence de pas préférée lors de la marche correspond à la fréquence de résonance d'un oscillateur harmonique forcé, déterminée par la longueur pendulaire des membres inférieurs et la gravité. Autrement dit, il est possible de prédire cette fréquence uniquement à partir de paramètres physiques. Un autre exemple provient des travaux de Lussiana et Gindre (2016) ayant observé que des différences de raideur des jambes, considérée comme une contrainte structurelle, induisent des patterns de course différents, chacun visant à minimiser le coût énergétique. Ces résultats suggèrent que le corps humain, via le principe d'auto-organisation, adapte naturellement sa coordination à ses contraintes internes.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

2. Les contraintes environnementales désignent les caractéristiques du milieu (gravité, température, lumière, vent, humidité, surface de jeu, bruit ambiant...) qui peuvent modifier le comportement moteur de l'individu.
3. Les contraintes liées à la tâche sont spécifiques à l'action demandée : objectifs à atteindre, règles du jeu, matériel utilisé, présence d'un adversaire ou d'un coéquipier.

Dans le domaine du tennis, Regan (2021) a identifié l'ensemble des contraintes s'appliquant à un joueur en situation de service en se basant sur les théories dynamiques (Tableau 2.8).

Catégorie	Exemples de contraintes
Contraintes de l'organisme	– Taille et envergure du joueur – Architecture musculaire – Sexe – Force musculaire – Raideur musculo-tendineuse – Profil force/vitesse – Niveau de fatigue – Technique des appuis utilisée – Latéralité (droitier/gaucher) – Œil directeur/capacités perceptivo-motrices (coordination œil-main) – Émotions/intentions
Contraintes de la tâche	– Règles du jeu (zone de service, deux balles de service, temps réglementaire avant de servir) – Hauteur du filet (0,91 m au centre) – Dimensions du terrain – Direction (T, extérieur, au corps) – Type de service (à plat, slicé, lifté)
Contraintes environnementales	– Vent/météo (en extérieur) – Bruit ou public – Surface (terre battue, dur, gazon) – Luminosité – Conditions de pression psychologique (score, adversaire, public) – Type de balles utilisées

TABLE 2.8 – Exemples de contraintes s'exerçant sur un joueur de tennis en situation de service, inspirés de Regan (2021)

2.6.2.3 Répercussions sur la pédagogie : « *Constraints-Led Approach* »

Dans cette approche, le rôle du système nerveux central n'est plus envisagé comme celui d'un simple centre de stockage de programmes moteurs prédéterminés. Sur le plan pédagogique, l'accent n'est plus mis sur la reproduction d'un « geste idéal », mais sur l'identification des paramètres d'ordre et des variables de contrôle (encore appelées contraintes),

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

permettant à l'apprenant d'adapter ses actions au contexte auquel il est confronté (Hoyt & Taylor, 1981).

L'approche orientée par les contraintes (*Constraints-Led Approach*) (Renshaw & Chow, 2019) redéfinit le rôle de l'entraîneur, qui n'est plus centrée sur la transmission directe d'un modèle technique, mais sur la conception de situations d'apprentissage adaptées. En modulant les contraintes liées à la tâche ou à l'environnement, l'entraîneur favorise l'exploration et la découverte de solutions motrices par le joueur. L'objectif devient alors de faciliter l'émergence de relations fonctionnelles entre l'individu et son environnement, dans des contextes dynamiques et évolutifs (Davids et al., 2008 ; Renshaw & Chow, 2019). L'entraîneur joue ici le rôle de facilitateur, aidant le joueur à mobiliser l'ensemble des ressources dont il dispose pour atteindre une performance optimale. Cela implique de mettre en œuvre des stratégies pédagogiques centrées sur l'individualisation de l'apprentissage, le développement de la prise de décision et la stimulation de l'exploration active (Crespo, 2009). Plusieurs principes pédagogiques fondamentaux issus de cette approche ont été mis en évidence dans la revue de Renshaw et Chow (2019). Parmi eux, on retrouve notamment le principe de « *repetition without repetition* » (Bernstein, 1967), qui consiste à favoriser l'apprentissage par la variation des situations vécues par le joueur, plutôt que par la simple répétition d'un même mouvement. Un autre principe central est celui de la « conception d'apprentissage représentative » (*Representative Learning Design*) (J. Y. Chow et al., 2011), qui vise à créer des tâches d'entraînement fidèles aux contraintes et exigences du contexte réel de performance.

2.6.3 La variabilité : avantage ou inconvénient ?

2.6.3.1 Définition de la variabilité intra et inter-individuelle

Le concept de « variabilité du mouvement » peut désigner différentes réalités selon le contexte d'étude, les contraintes de la tâche ou encore le niveau d'analyse retenu (Cowin et al., 2022). Utilisé seul, ce terme ne permet pas toujours de préciser ce qui est réellement investigué. Pour affiner la compréhension du concept de variabilité, Komar et al. (2015) distinguent plusieurs niveaux d'observation :

— la variabilité intra-essai renvoie aux fluctuations observées au sein d'un même essai

— la variabilité intra-individuelle (ou inter-essai) correspond aux différences entre plusieurs essais successifs, effectués par la même personne dans des conditions similaires

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

— la variabilité inter-individuelle (ou inter-sujet) concerne les différences entre individus réalisant la même tâche

Néanmoins, ces distinctions restent parfois insuffisantes pour décrire avec précision la nature fonctionnelle de la variabilité. C'est pourquoi Cowin et al. (2022) ont proposé un cadre théorique plus spécifique, identifiant des formes de variabilité intra-individuelle (Figure 2.15) :

— la variabilité stratégique, qui désigne les différentes méthodes utilisées pour accomplir une tâche

— la variabilité d'exécution, qui concerne les ajustements, intentionnels ou non, du mouvement entre les répétitions d'une même stratégie

— la variabilité du résultat, qui reflète les fluctuations du produit final de l'action

Ces catégories de variabilité, bien que spécifiquement décrites au niveau intra-individuel, peuvent également être appliquées à l'analyse de la variabilité inter-individuelle. Dans le cadre de cette thèse, l'attention se portera plus particulièrement sur la variabilité d'exécution. Selon, Bartlett et al. (2007), ce type de variabilité est l'un des plus courants dans les mouvements humains.

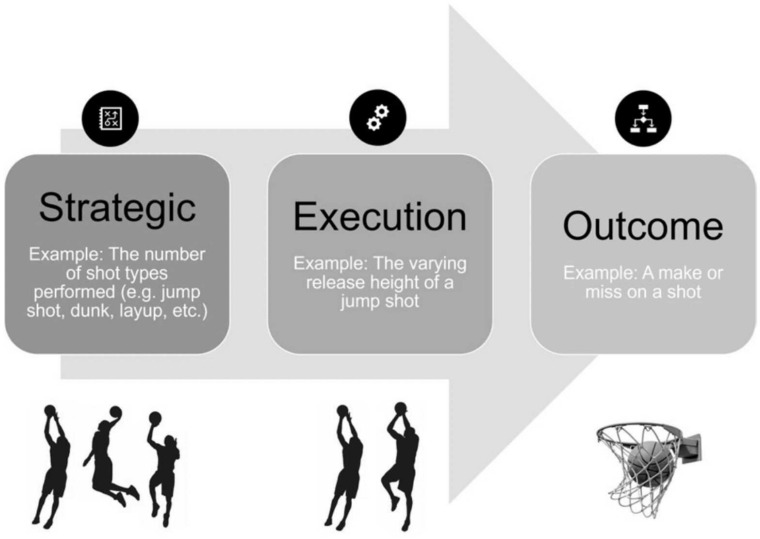


FIGURE 2.15 – Typologie de la variabilité du mouvement lors d'un tir au panier, d'après Cowin et al. (2022)

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

2.6.3.2 Méthodes de mesure de la variabilité

De nombreuses méthodes permettent de quantifier la variabilité du mouvement (Marineau et al., 2024 ; Preatoni et al., 2013). Dans leur revue de littérature, Marineau et al. (2024) ont mis en évidence que 21 méthodes différentes de caractérisation de la variabilité ont été mobilisées dans 59 études consacrées à l'analyse des mouvements sportifs, les plus fréquemment utilisées reposant sur des outils statistiques simples comme l'écart-type (ET ; utilisé dans 53 % des études) et le coefficient de variation (CV ; utilisé dans 15 % des études). L'ET constitue une mesure de dispersion classiquement employée pour quantifier l'amplitude des fluctuations autour de la moyenne, tandis que le CV correspond au rapport entre l'écart-type et la moyenne et permet d'exprimer une variabilité relative (Stergiou & Decker, 2011). A ce titre, le CV présente un intérêt lorsqu'il s'agit de comparer la variabilité de paramètres de nature différente ou lorsque les moyennes diffèrent entre groupes ou entre phases du mouvement, car il permet permet une interprétation indépendante de l'unité de mesure. Toutefois, plusieurs limites méthodologiques doivent être soulignées concernant son utilisation. D'une part, le CV devient instable et difficilement interprétable lorsque la moyenne de la variable est proche de zéro. D'autre part, il fournit une information globale sur l'amplitude de la dispersion mais ne permet pas de caractériser la structure de la variabilité, ni de rendre compte de profils temporels distincts ou de stratégies motrices différenciées entre individus. Ainsi, lorsque la variabilité inter-individuelle reflète l'existence de patterns de coordination multiples, comme cela a été suggéré dans plusieurs travaux récents en biomécanique du geste sportif, le recours à des approches complémentaires (analyses de profils, méthodes de clustering, analyses fonctionnelles) apparaît nécessaire pour dépasser une description purement quantitative de la dispersion et mieux appréhender la complexité des comportements moteurs (Komar et al., 2015 ; Marineau et al., 2024). Plus largement, le choix de la méthode dépend étroitement des objectifs de l'étude, chaque méthode mettant en lumière une facette spécifique de la variabilité du mouvement. Ainsi, la variance et l'écart-type renseignent principalement sur l'amplitude des fluctuations observées, tandis que les analyses non linéaires et les indices d'entropie permettent d'explorer la structure, la stabilité ou la complexité des comportements moteurs (Bartlett et al., 2007).

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

2.6.3.3 Place de la variabilité pour les théories cognitivistes : une erreur à supprimer

Pour les théories cognitivistes du contrôle moteur, un haut niveau d'expertise se caractérise par la capacité à reproduire une action motrice à l'identique de façon automatisée (Bertsch, 1995). Dans cette optique, l'accès à l'expertise se fait petit à petit en réduisant l'écart entre le comportement du sujet et celui de l'expert par une modification progressive des paramètres d'entrée du programme moteur (Famose, 1998). L'expertise est considérée comme la capacité à reproduire un « geste parfait » ou une « action motrice idéale ». Dans ce cadre conceptuel, les différences de comportements moteurs observées pour une même tâche prescrite et/ou pour un niveau de performance équivalent sont perçues comme un écart au comportement expert. Autrement dit, les variabilités intra et inter-individuelles sont tacitement perçues comme des erreurs ou des déviances indésirables qu'il faut éviter et réduire.

2.6.3.4 Répercussions sur l'analyse biomécanique du mouvement sportif

En biomécanique, l'étude du mouvement est encore souvent influencée par les conceptions des théories cognitivistes du contrôle moteur, reposant sur une logique comparative entre des groupes de niveaux différents et sur l'idée que les experts exécuteraient « la bonne technique » ou le « geste optimal » (Ericsson & Pool, 2016). Plusieurs travaux illustrent clairement cette approche normative. Ainsi, Guo et al. (2010) ont comparé la cinématique du pitch au baseball entre des joueurs amateurs et des professionnels. Leurs résultats ont montré que dix variables cinématiques, basées sur des mesures d'angles à des instants clés du mouvement, différaient entre les deux groupes. Dans la discussion, les auteurs affirment que « l'écart-type plus élevé des variables cinématiques dans le groupe amateur indique qu'ils n'ont pas de modèle spécifique de mouvement de lancer par rapport au groupe professionnel. Il est possible que les lanceurs amateurs n'aient pas appris les bonnes mécaniques de lancer .» Cette citation illustre clairement le statut négatif accordé à la variabilité inter-individuelle et la référence à un modèle de mouvement « idéal » incarné par les experts. Pourtant, leurs résultats ont aussi révélé des écart-types importants chez les professionnels au niveau de la flexion du genou avant ($85 \pm 25°$), de la rotation externe de l'épaule ($84 \pm 17°$), de la flexion du coude en phase de « wind-up » ($64 \pm 26°$) et au moment du lâcher de balle ($45 \pm 38°$) mais cette variabilité inter-individuelle n'est pas considérée par les auteurs. Une logique similaire est présente dans les travaux

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

de Zheng et al. (2008) ayant comparé le swing au golf entre des joueurs professionnels et des amateurs de trois niveaux de handicaps (classements) différents. Les auteurs ont montré que, au sommet du swing, les golfeurs professionnels présentaient des amplitudes significativement plus importantes d'adduction horizontale de l'épaule gauche ($125 \pm 6°$), de rotation externe de l'épaule droite ($66 \pm 11°$) et de rotation longitudinale du tronc ($60 \pm 7°$) ainsi que des vitesses angulaires d'extension des poignets, du coude droit et de la tête du club de golf significativement supérieures par rapport aux amateurs. Sur la base de ces différences, les auteurs ont conclu à l'existence d'une « mauvaise » mécanique de swing chez les joueurs de plus faible niveau. Les valeurs moyennes des professionnels étaient implicitement érigées au rang de valeurs cibles idéales à atteindre. Au contraire, d'autres études consacrées au swing de golf ont mis en évidence qu'il existait une importante variabilité intra et inter-individuelle pour ce mouvement aussi bien chez les joueurs experts que non experts. Dans ces travaux, la variabilité est perçue non pas comme une erreur mais comme une richesse témoignant de la capacité des individus à explorer, adapter et stabiliser leurs propres coordinations motrices (Davids et al., 2003 ; Glazier & Lamb, 2017 ; Langdown et al., 2012). Ces études font davantage référence au statut positif de la variabilité véhiculé par les théories dynamiques que nous allons à présent aborder.

2.6.3.5 Place de la variabilité pour les théories dynamiques : une source de solutions motrices permettant aux individus de s'adapter aux contraintes

Comme évoqué précédemment, les premières réflexions autour de la variabilité remontent aux travaux de Bernstein (1967). En observant les mouvements de forgerons expérimentés, Bernstein (1967) a remarqué qu'ils parvenaient à frapper systématiquement au même endroit sur l'enclume, sans pour autant reproduire exactement le même mouvement à chaque fois (Figure 2.16). Il qualifie ce phénomène de « *repetition without repetition* », soulignant une variabilité intra-individuelle au sein d'une même tâche pourtant réussie avec précision. À partir de cette observation, il pose les fondements de l'idée selon laquelle le mouvement humain est fondamentalement variable, même chez les experts.

Ces travaux ouvriront la voie, plusieurs décennies plus tard, à l'émergence des théories des systèmes dynamiques. Dans ce cadre théorique, la variabilité n'est plus perçue comme un bruit qu'il faudrait éliminer, mais au contraire comme un mécanisme adaptatif, permettant à l'individu d'ajuster ses coordinations motrices en fonction des contraintes qui pèsent sur lui (Newell, 1986). Ainsi, on considère que plusieurs solutions motrices peuvent

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

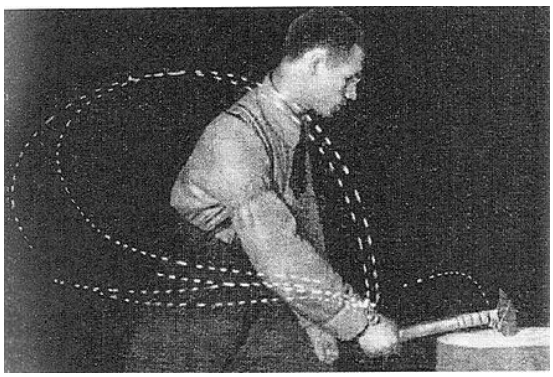


FIGURE 2.16 – Illustration de la variabilité de deux mouvements de marteau réalisés par un forgeron expert, d'après Bernstein (1967)

exister pour atteindre un même objectif et/ou une même performance plutôt qu'une seule solution motrice perçue comme « optimale » ou « parfaite ». Ainsi, ce changement de paradigme permet de mieux comprendre pourquoi les mouvements peuvent varier d'un individu à l'autre (variabilité inter-individuelle) et aussi chez un même individu selon les situations (variabilité intra-individuelle) (Glazier, 2006 ; Glazier & Davids, 2009).

Ce changement de paradigme s'est également accompagné d'un rapprochement progressif entre la biomécanique et le contrôle moteur pour donner naissance à une approche non linéaire de l'analyse du mouvement (Davids et al., 2008 ; Glazier, 2006 ; Kelso, 1995 ; Seifert et al., 2013). Dans cette optique, Glazier et Mehdizadeh (2019) ont critiqué les analyses biomécaniques fondées sur des moyennes de groupes, soulignant qu'elles tendent à masquer la variabilité inter-individuelle et à ne fournir que des tendances globales, souvent peu informatives à l'échelle individuelle. Ils ont aussi souligné que les analyses individualisées seraient plus intéressantes car elles permettent de révéler la richesse et la diversité des stratégies motrices entre les individus. Ils ont également rappelé que, bien que les modélisations ou simulations numériques peuvent identifier des techniques « optimales », leur applicabilité réelle reste incertaine en raison de la variabilité inter-individuelle inhérente aux comportements moteurs humains.

Si la variabilité est considérée comme un élément facilitateur de l'adaptation et un levier fonctionnel de la performance, il est pertinent de s'interroger sur sa présence et son rôle selon le niveau de pratique. En d'autres termes, la variabilité se manifeste-t-elle de manière similaire chez les experts et les débutants, et remplit-elle les mêmes fonctions selon le degré de pratique ? C'est précisément la question abordée par Seifert et al. (2011) à travers l'étude de la variabilité inter-individuelle de la coordination entre les membres

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

supérieurs et inférieurs lors de la nage en brasse chez des nageurs amateurs et professionnels. Les auteurs ont proposé un modèle original de classification, représenté sous la forme de sablier (Figure 2.17), pour représenter l'évolution de la variabilité selon le niveau de pratique. Selon ce modèle, les nageurs débutants présentent initialement une grande variabilité inter-individuelle, traduisant une phase d'exploration de différentes stratégies motrices pour répondre aux contraintes nouvelles imposées par le milieu aquatique. À mesure qu'ils progressent vers un niveau plus élevé, cette variabilité tend à se resserrer autour de solutions efficaces, grâce à l'entraînement. Enfin, au plus haut niveau de performance, les nageurs experts manifestent de nouveau une forme de variabilité, cette fois orientée vers l'optimisation leur permettant d'ajuster finement leur technique en fonction de leurs caractéristiques propres et des contraintes (de l'organisme, de la tâche et de l'environnement) pour optimiser davantage leur performance. Les résultats de l'étude de Seifert et al. (2011) ont partiellement confirmé ce modèle conceptuel en montrant une variabilité inter-individuelle plus importante chez les nageurs amateurs que chez les nageurs compétiteurs. Selon Seifert et al. (2011), cette différence de variabilité inter-individuelle peut s'expliquer par des objectifs différenciés chez les amateurs : certains se focalisant davantage sur la flottabilité, tandis que d'autres organisent leur coordination avant tout pour améliorer leur propulsion.

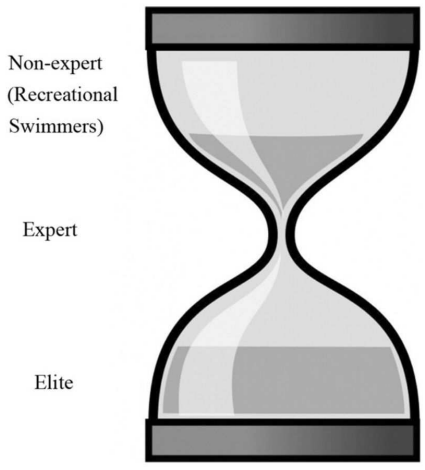


FIGURE 2.17 – Représentation schématique de la variabilité inter-individuelle en fonction du niveau d'expertise, d'après Seifert et al. (2011)

Comme mentionné précédemment, les contraintes jouent un rôle très important dans la résolution du problème des degrés de liberté, contribuant ainsi à rendre la variabilité

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

« fonctionnelle ». Ainsi, en se basant sur le mouvement de « sidestepping », Kadlec et al. (2023) ont avancé qu'il existerait une relation inversement proportionnelle entre la variabilité du mouvement et les contraintes liées à la tâche (Figure 2.18). Selon eux, la gamme des stratégies de mouvements possibles diminue à mesure que les contraintes de la tâche augmentent et s'exercent de plus en plus fortement. Lorsque les contraintes sont excessives et réduisent drastiquement les options motrices possibles pour l'athlète, il peut exister un risque important de blessures pour ce dernier, appelé « worst case scenario ». Néanmoins, la réduction du nombre de stratégies possibles pourrait être compensée par le développement des qualités physiques et des qualités de perception-action de l'athlète, permettant une meilleure adaptation de l'individu aux situations les plus exigeantes.

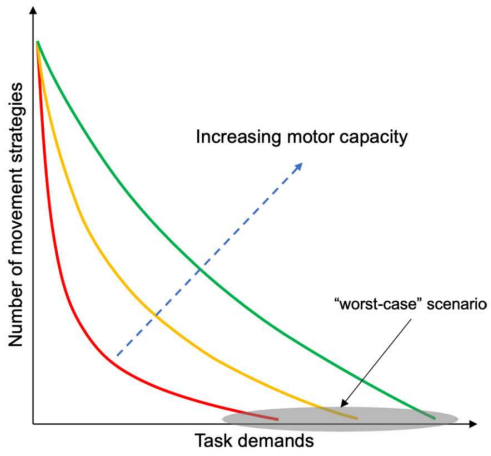


FIGURE 2.18 – Relation théorique entre les contraintes liées à la tâche et le nombre de stratégies de mouvement possibles avec l'augmentation des capacités motrices, d'après Kadlec et al. (2023)

Cette relation théorique développée par Kadlec et al. (2023) pour le sidestepping pourrait s'illustrer assez facilement pour d'autres mouvements. Prenons pour exemple un mouvement de soulever de charge depuis le sol. Si la charge est légère, la contrainte est considérée comme faible, et de nombreuses options de mouvement seront possibles. En revanche, au fur et à mesure de l'augmentation de la masse de la charge à soulever, les possibilités de mouvement vont se restreindre à des stratégies motrices de moins en moins variables entre les tentatives ou entre les sujets. Ce principe peut aussi s'appliquer sur le plan temporel. En effet, il a été démontré que le niveau de variabilité inter-individuelle d'un même mouvement peut varier en fonction des différentes phases du mouvement et se réduire à l'approche de l'instant-clé du mouvement, là où les contraintes de la tâche sont les plus élevées. Par exemple, pour le tir au basket-ball, la variabilité de la cinématique de

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

l'épaule est plus élevée pendant la phase descendante (aussi appelée phase de préparation) et plus faible pendant la phase ascendante (phase d'accélération) à l'approche du lâcher du ballon (Ae, 2020).

2.6.3.6 L'analyse de la variabilité du mouvement sportif : où en est le tennis ?

Dans le cadre des théories dynamiques, la compréhension du mouvement sportif prend de plus en plus compte les variabilités intra et inter-individuelles et s'éloigne progressivement du paradigme d'une technique unique dite « idéale ». Une récente revue systématique menée par Marineau et al. (2024) a mis en évidence une hausse importante du nombre d'articles s'intéressant à la question de la variabilité du mouvement sportif, notamment chez des athlètes experts. Les sports les plus concernés par l'essor de ce type de publications sont la course à pied ($n = 11$), la danse ($n = 6$), la natation ($n = 5$) et le golf ($n = 5$). Le tennis reste en retard avec une seule publication rapportée dans le domaine par Marineau et al. (2024), à laquelle nous pouvons ajouter les travaux de Whiteside et al. (2015) et d'Antúnez et al. (2012). Pour le service, Whiteside et al. (2015) ont observé une réduction de la variabilité intra-individuelle de l'extension du genou entre l'instant du zénith du lancer de balle et celui où la raquette atteint son point le plus bas dans le dos, et ce, indépendamment du niveau des joueuses. Ces résultats suggèrent que les joueuses de tennis semblent réduire la variabilité des mouvements des membres inférieurs à l'approche de l'instant crucial de l'impact pour optimiser et stabiliser leur propulsion verticale, en réponse à la contrainte imposée par la tâche, notamment celle de faire passer la balle pardessus le filet. De leur côté, Antúnez et al. (2012) ont identifié, chez des joueurs de tennis de niveau national, qu'une augmentation de la variabilité intra-individuelle de la vitesse de la main, quantifiée à l'aide du coefficient de variation, était associée à une diminution significative de la précision du service. Ce résultat suggère que la variabilité, si elle devient importante lorsque les contraintes sont trop élevées, peut être néfaste à la performance. À ce jour, les études permettant d'explorer la variabilité inter-individuelle de la cinématique du service au tennis demeurent limitées. En effet, la littérature, repose principalement sur trois grandes approches méthodologiques pour identifier les facteurs biomécaniques de performance au service ayant tendance à délaisser la question de la variabilité :

1. La première consiste à analyser les valeurs cinématiques moyennes des services frappés par un échantillon de joueurs experts ou de haut niveau. Ces valeurs sont souvent utilisées comme référence étalon pour dégager une « technique de service de référence » (Elliott et al., 1986 ; Fleisig et al., 2003 ; Van Trigt et al., 2025).

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

2. La seconde cherche à évaluer l'influence des paramètres cinématiques sur des facteurs de performance tels que la vitesse de balle ou encore la vitesse maximale de la tête de raquette, au moyen d'analyses de corrélations ou d'estimations de contributions segmentaires (Dossena et al., 2016 ; Elliott et al., 1995 ; Fourel et al., 2024 ; Jacquier-Bret & Gorce, 2024a ; Martin, Kulpa, Delamarche & Bideau, 2013 ; Sweeney et al., 2012).
3. La troisième vise à comparer les valeurs cinématiques moyennes entre des populations de joueurs présentant des niveaux d'expertise différents afin d'identifier ce qui caractérise et différencie les experts des autres joueurs (Martin, Bideau, Ropars et al., 2014 ; Söğüt, 2017 ; Touzard, 2021 ; Tubez et al., 2021 ; Whiteside et al., 2013b).

2.7 Identification des stratégies motrices menant à une même performance

Le positionnement épistémologique des approches dynamiques, qui considèrent positivement la variabilité inter-individuelle, attribue une place centrale aux stratégies motrices individuelles. Dans cette perspective, les analyses statistiques menées en biomécanique ne reposent plus sur la comparaison de moyennes entre des groupes avec un objectif de généralisation des résultats, mais cherchent davantage à identifier des stratégies motrices, notamment à travers la classification des individus.

2.7.1 Concept d'équifinalité

En biomécanique, la notion d'équifinalité renvoie à la capacité des individus à atteindre un même objectif moteur tout en présentant une variabilité intra ou inter-individuelle importante dans l'exécution du mouvement (Bernstein, 1967 ; Cusumano & Cesari, 2006). Pour une tâche donnée comme marcher (Decker et al., 2012), viser une cible (Müller & Loosch, 1999) ou maintenir une posture (Balasubramaniam et al., 2000), le système moteur peut mobiliser une infinité de solutions, rendues possibles par la redondance des degrés de liberté ou « motor abundance » (Bernstein, 1967 ; Latash, 2012). Cette richesse n'est pas considérée comme un défaut, mais au contraire comme une ressource qui permet une grande flexibilité adaptative dans l'organisation des actions motrices.

Ce concept a été illustré à travers plusieurs études expérimentales. Par exemple, dans une tâche de slalom sur simulateur de ski, Vereijken et al. (1992) ont montré qu'au dé-

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

but de l'apprentissage, les sujets « gèlent » leurs degrés de liberté en rigidifiant leurs mouvements. Avec la pratique, ces degrés de liberté sont progressivement libérés et permettent l'émergence de coordinations plus individualisées et plus efficaces, révélant une diversité de stratégies motrices pour atteindre le même objectif. Un phénomène comparable d'équifinalité a été mis en évidence pour le lancer de fléchettes. Malgré une forte variabilité intra-individuelle au niveau des paramètres cinématiques du bras et de l'avant-bras, les participants parvenaient à atteindre la cible avec précision (Müller & Loosch, 1999). Lorsqu'une contrainte limitant le mouvement sur le plan vertical était introduite, les participants adaptaient leur coordination segmentaire tout en maintenant le même niveau de performance. En tennis de table, Bańkosz et Winiarski (2020) ont observé une forte variabilité inter-individuelle des angles de l'épaule, du coude et du poignet à différents moments clés du coup droit, alors que l'accélération de la main au moment de l'impact demeurait relativement stable entre les joueurs. Les auteurs interprètent ces résultats comme la démonstration que différentes stratégies motrices individuelles peuvent conduire à une performance similaire, confirmant ainsi l'existence du principe d'équifinalité dans le contrôle du mouvement.

2.7.2 Méthodes de clustering

Les méthodes de clustering sont des techniques statistiques multivariées non supervisées, visant à analyser un ensemble d'observations décrites par plusieurs dimensions caractéristiques, à partir d'un indice de similarité permettant de regrouper les objets présentant des structures ou des patterns communs (Rein et al., 2010). L'analyse en clusters peut suivre une approche exploratoire ou confirmatoire (Schöllhorn et al., 2013). L'approche exploratoire consiste à regrouper les observations sans hypothèse préalable sur le nombre ou la nature des classes, ce qui permet de révéler de nouvelles catégories de comportements moteurs à interpréter. À l'inverse, l'approche confirmatoire repose sur des classes définies à l'avance, que l'on cherche ensuite à tester et valider.

Grâce aux avancées technologiques en capture du mouvement et en traitement informatique, il est désormais possible de collecter des données cinématiques à grande échelle. Ces progrès ont considérablement élargi les possibilités d'analyse en biomécanique sportive, où le clustering est utilisé pour identifier et classifier des stratégies motrices, qu'elles soient extraites de données discrètes ou continues, sans nécessiter de catégorisation préalable (Hayen, 2006 ; Warmenhoven, 2024). Ces approches ont été appliquées avec succès dans diverses disciplines sportives (Floría et al., 2024 ; Jauhiainen et al., 2020 ; Martens

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

et al., 2016 ; Morais et al., 2022 ; Rauch et al., 2020). A titre d'exemple, Phinyomark et al. (2015) ont utilisé une analyse en clusters hiérarchique pour classifier les stratégies de course de 121 coureurs, à partir de données cinématiques de la cheville, du genou et de la hanche. Leur méthode a permis d'identifier deux profils de course distincts, différenciés par les angles du genou dans les plans frontal et sagittal. Cependant, si le clustering peut sembler relativement simple à mettre en œuvre, le choix d'une méthode appropriée reste complexe. La littérature recense en effet une grande variété d'approches, sans qu'aucune ne puisse être considérée comme supérieure (Hennig, 2015). Le choix de la méthode utilisée doit être guidé à la fois par la nature des données (continues, discrètes, multivariées, bruitées...) et par les objectifs de l'analyse, c'est-à-dire par la conception même de ce qu'est un « cluster » dans le contexte étudié (Hennig, 2015).

En biomécanique, l'attention s'est récemment portée sur des méthodes de clustering conçues pour analyser des données continues, dans le but de préserver la structure temporelle des données cinématiques et/ou dynamiques (Forrester & Townend, 2015 ; Guess et al., 2020 ; Komitova et al., 2022 ; Warmenhoven, 2024 ; Warren Liao, 2005). Dans ce contexte, les méthodes issues de l'analyse fonctionnelle des données (Functional Data Analysis) apparaissent particulièrement intéressantes (Jacques & Preda, 2014 ; Ramsay & Silverman, 2005 ; Schmutz et al., 2020). Elles permettent d'identifier des stratégies motrices directement à partir des trajectoires temporelles, qu'elles soient représentées par leurs valeurs instantanées, par leurs coefficients de décomposition (splines, bases de Fourier) ou par leurs scores de composantes principales fonctionnelles (fPCA). Ces méthodes sont capables de mettre en évidence des structures qui resteraient invisibles avec des approches de clustering classiques basées sur des données discrètes (Ramsay & Silverman, 2005).

2.7.3 Qu'en est-il au tennis ?

A ce jour, les méthodes de clustering n'ont jamais été appliquées au service au tennis pour identifier de potentielles stratégies motrices susceptibles d'aboutir à un niveau de performance équivalent. Néanmoins, certaines stratégies motrices bien connues des joueurs et des entraîneurs ont fait l'objet d'investigations en biomécanique. Plusieurs travaux ont analysé et comparé différentes techniques d'appuis utilisées au service (le relais d'appuis et les appuis écartés) par des joueurs d'un même niveau de pratique (Bahamonde & Knudson, 2001 ; Elliott & Wood, 1983 ; Girard et al., 2010 ; Martin et al., 2012 ; Reid et al., 2008). Leurs résultats convergent vers un consensus : le relais d'appuis favorise

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

la production de forces de réaction du sol supérieures dans le plan vertical, tandis que les appuis écartés offriraient une plus grande stabilité et favoriseraient la propulsion du joueur vers l'avant. Ces techniques ne se distinguent pas sur le plan de la performance en termes de vitesse de balle. D'autres travaux ont étudié l'influence des stratégies de montée de raquette vers la position armée (Elliott, Reid & Crespo, 2003 ; Seeley et al., 2008). La « préparation compacte » ou « abrégée » (Van der Meer, 2001) se distingue de la « préparation traditionnelle » par une absence de descente verticale de la raquette en phase de préparation. Il a été démontré que les niveaux de contraction musculaire, la vitesse de balle et les contraintes articulaires ne diffèrent pas entre ces deux techniques de montée de raquette (Elliott, Reid & Crespo, 2003 ; Seeley et al., 2008). Si certaines stratégies motrices au service sont facilement observables, d'autres demeurent plus discrètes et difficilement identifiables à l'œil nu. Leur mise en évidence nécessite des méthodes d'analyse plus approfondies, capables d'intégrer des variables dont le lien avec la performance n'est pas nécessairement directe et prendre en compte la dynamique temporelle du mouvement.

2.8 Comment les entraîneurs de tennis analysent-ils et enseignent-ils la technique de service ?

2.8.1 Des propositions de « modèle » de service issues de la littérature scientifique

A partir des connaissances produites par la recherche en biomécanique du service et présentées lors des sections précédentes, plusieurs auteurs ont proposé des modèles d'analyse de service à destination des entraîneurs.

Le modèle développé par Elliott (2006) repose sur une représentation structurée et déterministe des différentes composantes biomécaniques du service, en particulier celles qui influencent la vitesse de la balle (Figure 2.19). Il s'appuie sur une approche mécanique rigoureuse visant à décomposer le geste en une série d'éléments techniques interdépendants, allant de la position des pieds au départ du mouvement jusqu'aux éléments influençant la trajectoire de la balle. L'un des atouts majeurs de ce modèle réside dans sa capacité à recenser de manière précise l'ensemble des facteurs impliqués dans la performance, tout en identifiant leur contribution respective à différents indicateurs tels que la vitesse horizontale de la raquette, l'alignement de celle-ci, ou encore la quantité de rotation imprimée à la balle. Toutefois, malgré sa richesse analytique, ce modèle présente plusieurs limites. Il

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

ne prend notamment pas en compte certains facteurs individuels susceptibles d'influencer la performance et la cinématique du geste (paramètres anthropométriques, sexe, capacités physiques, latéralité) et présente plusieurs limites en termes d'applicabilité sur le terrain. Sa complexité et son niveau d'exigence technique peuvent le rendre difficilement accessible aux entraîneurs qui privilégient souvent des outils plus simples et directement exploitables. C'est pourquoi, en pratique, il est possible que de nombreux entraîneurs préfèrent adopter une approche centrée sur quelques points clés du mouvement plus faciles à observer, à enseigner et à corriger.

Le modèle d'analyse du service OTSA (Observational Tennis Serve Analysis), présenté par N. L. Myers et al. (2017), est un outil d'observation et d'évaluation conçu pour être utilisé sur le terrain par les entraîneurs. Ce modèle repose sur l'identification d'une mécanique dite « idéale », qualifiée dans l'article de « *picture of good mechanics* » devant servir de référence aux entraîneurs pour l'évaluation du service (Tableau 2.9). Chaque composante technique du service (appelée « nœud ») est analysée à partir d'images clés du mouvement représentant la manière « correcte » ou « efficace » de servir ou non, selon des critères prédéfinis. Pour chaque élément jugé conforme à cette référence, un point est attribué, et le score final obtenu reflète la qualité globale de la technique du service. À l'inverse, les éléments jugés non conformes à ce modèle sont associés à une « *picture of bad mechanics* ».

Un autre modèle d'analyse très connu est celui proposé par Kovacs et Ellenbecker (2011b). Contrairement à un simple découpage du service en phases successives, ce modèle va plus loin en décrivant avec précision les éléments techniques à respecter dans chacune de ces phases. Il s'appuie sur une solide analyse issue de la littérature scientifique et offre un bon compromis entre rigueur scientifique et applicabilibité pratique Sa structuration permet de guider une analyse technique relativement fine tout en demeurant suffisamment claire pour être utilisée par les entraîneurs en contexte de terrain. Cependant, il reste fortement normatif et manque de précision quant à la variabilité observée entre les joueurs dans chaque phase du service. Pourtant, les auteurs reconnaissent que la phase de préparation reflète davantage un style personnel propre à chaque joueur. Toutefois, leur analyse se limite à évoquer les différences de techniques d'appuis, sans approfondir les autres sources de variabilité. Or, une vision aussi normative tend ainsi à restreindre la compréhension globale et contextualisée du mouvement et ne permet pas de prendre en compte les spécificités motrices propres à chaque joueur.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

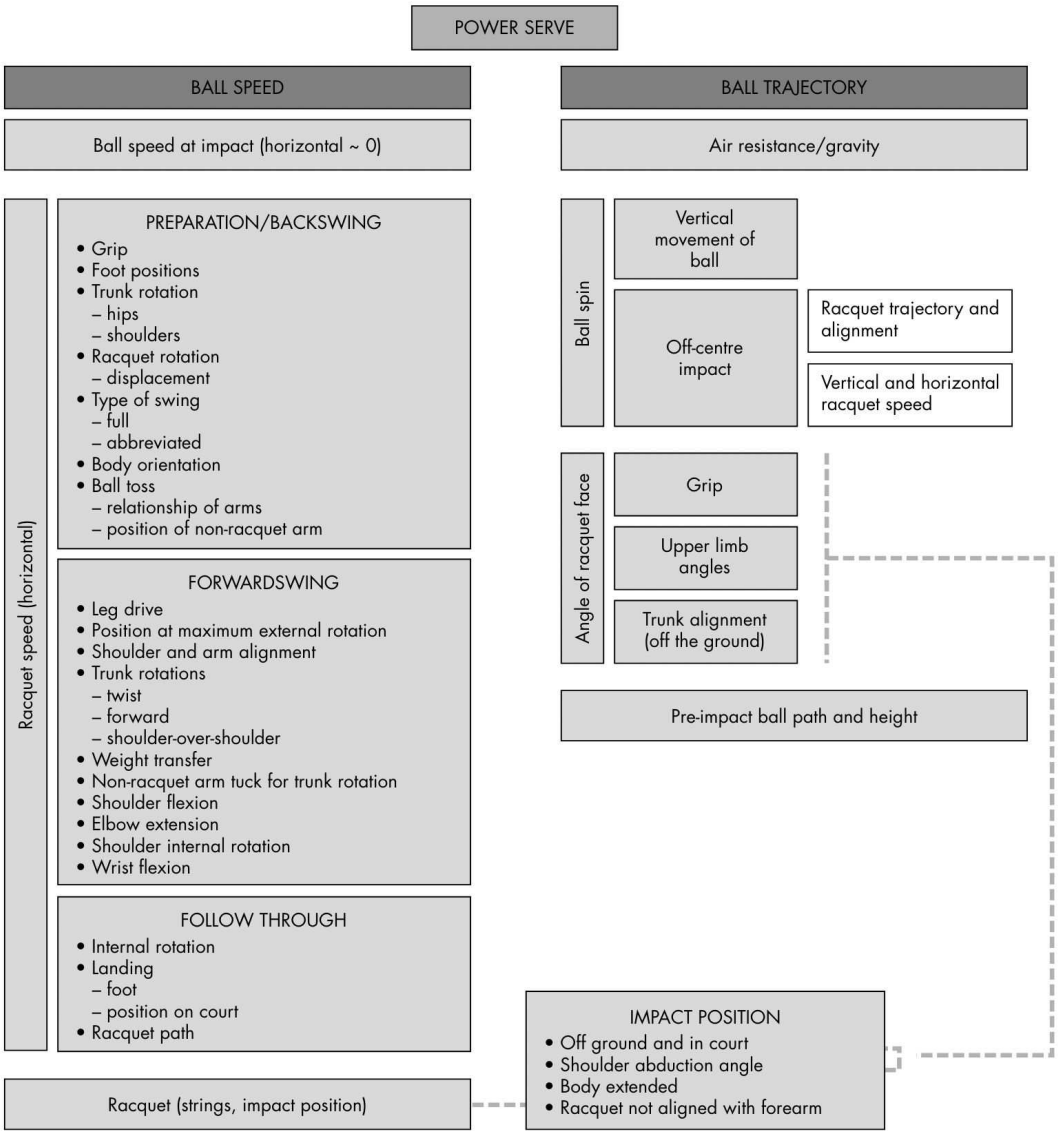


FIGURE 2.19 – Modèle du service intégrant des éléments techniques structurés et interconnectés, d'après Elliott (2006)

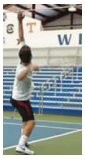
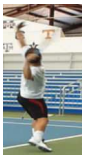
	Mécanique efficace		Mécanique inefficace	
Nœud 1 : Pied	Pied arrière derrière le pied avant		Pied arrière devant le pied avant	
Nœud 2 : Genou	Genoux fléchis $> 15°$		Genoux fléchis $\leq 15°$	
Nœud 3 : Rotation hanches	Hanche arrière s'éloigne du filet		Hanche arrière immobile	
Nœud 4 : Inclinaison hanche	Hanche arrière vers le sol		Hanche arrière droite	
Nœud 5 : Bascule hanches	Hanche avant stable		Hanche avant vers l'avant	
Nœud 6 : Angle de séparation	Angle $\approx 30°$		Angle $\neq 30°$	
Nœud 7 : Rotation tronc	Rotation longitudinale		Flexion / hyper-rotation	
Nœud 8 : Bras	Épaule alignée scapula		Hyper / hypo-cocking	
Chaîne cinématique	Impulsion jambes + tronc		Tronc dominant	

TABLE 2.9 – Grille d'évaluation visuelle du service OTSA, d'après N. L. Myers et al. (2017)

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

2.8.2 La persistance du modèle « idéal » de service à copier

Du côté des entraîneurs, un constat s'impose : nombre d'entre eux continuent à orienter l'enseignement du service vers la reproduction d'une technique conforme à un modèle interne de référence, fondé sur des principes techniques rigides, plutôt que sur une compréhension de la « fonctionnalité » du mouvement (E. Anderson et al., 2021 ; Fetisova et al., 2021). Dans cette perspective, Fetisova et al. (2021) se sont intéressés aux modèles « internes » utilisés par les entraîneurs de tennis novices et experts afin de mieux comprendre leurs connaissances de la technique du service, leur manière d'analyser ce geste et leur façon de l'enseigner aux joueurs. L'objectif était d'explorer les paramètres que les entraîneurs de tennis associent à une technique de service de haut niveau. Pour cela, ils ont mené des interviews auprès de 8 entraîneurs masculins de tennis australiens (4 experts, ayant chacun plus de 20 années d'expérience de l'entraînement, et 4 novices, ayant entre 2 et 4 années d'expérience de l'entraînement). Leurs résultats ont montré que les entraîneurs de tennis s'appuient principalement sur leur modèle « interne » de technique de service qu'ils comparent à la technique des joueurs qu'ils entraînent. La principale différence entre entraîneurs experts et novices réside dans le niveau de maîtrise des concepts et des principes biomécaniques, ainsi que dans leur compréhension des relations entre les différents composants techniques du geste. Les entraîneurs experts étaient capables d'appréhender le service de tennis comme un système global et cohérent, alors que les novices se concentraient davantage sur des éléments techniques isolés. L'expertise de l'entraîneur de tennis semble être principalement définie par sa capacité à comprendre « la fonctionnalité » du service, c'est-à-dire à appliquer les principes biomécaniques à la technique tout en ayant une vision globale et fonctionnelle du mouvement. Cette compréhension approfondie des liens et interactions entre les différents éléments techniques apparaît comme un élément central de l'expertise en entraînement. Les auteurs ont souligné que cette capacité à comprendre « la fonctionnalité » du service s'inscrit pleinement dans les approches dynamiques basées sur les contraintes évoquées précédemment, qui encouragent à reconnaître et à valoriser la variabilité inter-individuelle et les stratégies motrices.

Malgré tout, les résultats de cette étude ont montré que de nombreux entraîneurs restent attachés à une vision très « quantitative » et normative de la technique de service, basée sur des valeurs moyennes issues de la littérature scientifique et observées à des instants clés du service. En effet, plusieurs extraits d'entretiens illustrent cette tendance, certains entraîneurs évoquant par exemple la recherche de « 90° de flexion entre l'avant-

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

bras et le bras en position armée » ou encore « une flexion des genoux à 110° plus ou moins 10°.» Dans sa thèse, Fetisova (2021) rapporte notamment les propos d'un entraîneur expliquant ce qu'il observe chez ses joueurs au service : « Sont-ils dans leur position idéale de préparation, avec la raquette en l'air au point culminant du lancer ? Je suppose que cette position idéale est basée sur mon expérience d'entraîneur. Ma connaissance du service professionnel, de ce à quoi ressemble un bon serveur, et ensuite, à partir de mon expérience et de mes qualifications, je m'appuie sur certains critères. Par exemple, un point de contrôle pour moi est la position idéale au sommet du lancer, dans la position d'armée. Je regarde combien il y a de flexion au niveau des genoux, ce qui donne une indication sur le niveau d'engagement des jambes. Je vérifie également, du point de vue de la mécanique du lancer, s'il y a bien un angle de 90° sous le bras et entre la main et le coude. Enfin, je prête attention à l'angle de séparation du haut du corps, c'est-à-dire si le torse est légèrement tourné au-delà des hanches dans la position de préparation, lors de la position d'armée. » Cet extrait souligne la référence à un modèle « idéal » de service qui se base sur le geste du champion que l'on prend comme exemple.

De leur côté, E. Anderson et al. (2021) se sont intéressés aux philosophies de dix entraîneurs de tennis de haut niveau et leur approche de la conception de l'entraînement. Les résultats indiquent que, bien que l'expérience d'ancien joueur professionnel ne soit pas perçue comme une condition indispensable pour être un bon entraîneur, elle est considérée comme un atout permettant de modéliser plus efficacement une façon « correcte » ou « optimale » de jouer au tennis, comparativement aux entraîneurs n'ayant pas évolué à haut niveau. Le fait de proposer aux joueurs un modèle technique à reproduire indique que les entraîneurs pensent qu'une représentation mentale partagée de la « bonne » technique est nécessaire pour que les joueurs apprennent. Une telle posture pédagogique tend toutefois à questionner la place accordée à la variabilité dans le développement des compétences techniques et renvoie à une conception de l'apprentissage encore largement ancrée dans une approche traditionnelle de l'entraînement, centrée sur la reproduction d'un modèle prescrit.

Dans une étude réalisée auprès de 320 entraîneurs de sports variés portant sur leurs méthodes actuelles et préférées d'acquisition de nouvelles connaissances en matière d'entraînement, Stoszkowski et Collins (2016) ont montré que 12 % des entraîneurs avaient utilisé internet et les réseaux sociaux comme source de « formation » la plus récente. Cette modalité de formation « dite informelle » arrivait en 3^{e} position, derrière la formation obtenue en échangeant avec des collègues ou des mentors (39 %) et les formations

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

fédérales et universitaires (25 %) , mais devant les conférences et séminaires (6 %). L'essor des plateformes de médias sociaux, telles que YouTube, Twitter, Instagram et Facebook, a transformé le paysage du partage des connaissances dans le domaine du coaching sportif. Ces plateformes ont facilité la diffusion mondiale de l'expertise en matière d'entraînement, permettant aux entraîneurs, indépendamment de leur localisation géographique, de partager des expériences, d'échanger des idées et d'améliorer leurs méthodologies. A titre d'exemple, YouTube est devenu une plateforme centrale où les entraîneurs peuvent partager des tutoriels vidéo, des séances d'entraînement et des analyses détaillées, offrant ainsi aux entraîneurs en herbe un large éventail de connaissances et une exposition aux styles d'entraînement de professionnels confirmés (Sazali, 2024). Le tennis ne fait pas exception à ce phénomène puisque les entraîneurs comme les académies de tennis sont de plus en plus nombreux à utiliser internet et les réseaux sociaux comme moyen de promotion, de diffusion et de mise à jour des connaissances liées à l'entraînement (Cordova, 2016). Au cours de ces dernières années, nous assistons à la prolifération de vidéos sur les réseaux sociaux qui incitent les entraîneurs et les joueurs à copier les gestes de service des joueurs professionnels, entretenant ainsi l'illusion qu'il existerait un « service parfait » à reproduire (Figure 2.20). Ces contenus, souvent très séduisants visuellement, véhiculent une image standardisée du geste, sans tenir compte de la variabilité inter-individuelle qui pourrait exister entres les joueurs.

2.8.3 Vers une nouvelle approche de la motricité et de l'entraînement en tennis ?

Dès 2009, l'ITF a appelé les entraîneurs à dépasser les méthodes d'analyse et d'entraînement traditionnelles appliquées au tennis, en raison de la nature dynamique et interactive de ce sport (Crespo, 2009). Depuis, l'ITF a multiplié les efforts pour faire évoluer les pratiques pédagogiques. Cela s'est notamment traduit par le développement de nouvelles approches d'apprentissage telles que « *Play & Stay* » (Martínez-Gallego et al., 2022), ainsi que par l'adaptation du matériel pédagogique (Fadier et al., 2021 ; Piquer-Piquer et al., 2025 ; Touzard et al., 2023). Dans cette dynamique, les entraîneurs sont de plus en plus encouragés à adopter des approches exploratoires plutôt que prescriptives (Reid et al., 2007). Parmi ces approches, les pédagogies basées sur la manipulation des contraintes semblent particulièrement prometteuses, car elles permettent un espace d'expression individuelle plus large, en rompant avec des modèles techniques rigides (Renshaw

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

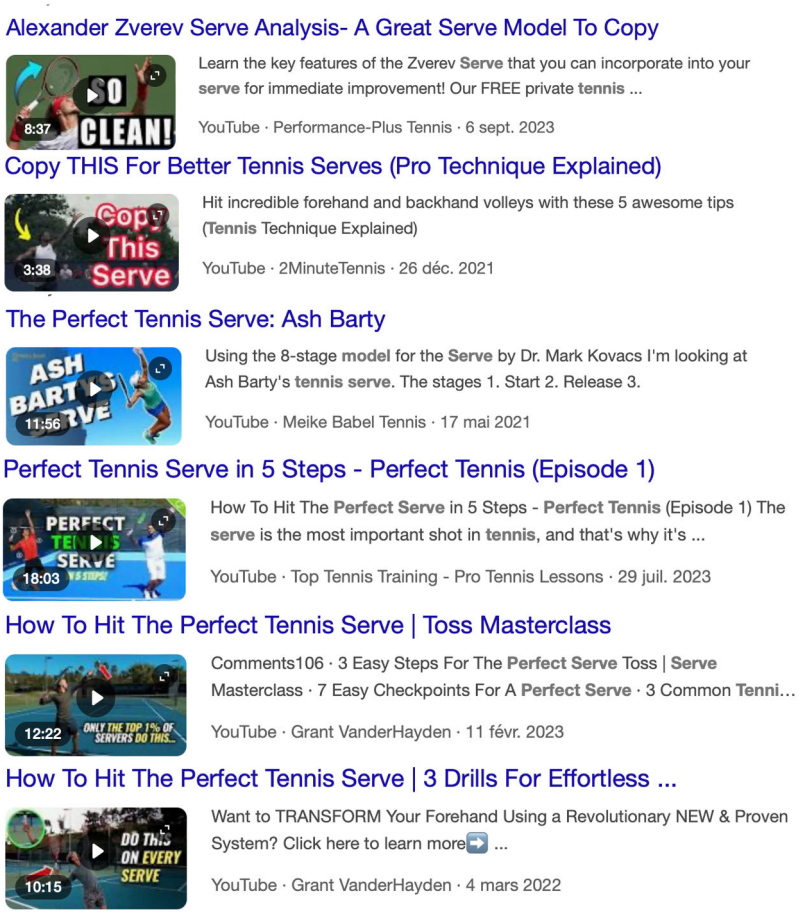


FIGURE 2.20 – Exemples de vidéos de réseaux sociaux présentant un service « parfait » à imiter

& Chow, 2019). Plusieurs travaux ont confirmé l'intérêt de ces approches dans le contexte du tennis. Par exemple, Lee et al. (2014) ont montré que lors de l'apprentissage du coup droit, une pédagogie non linéaire basée sur la manipulation des contraintes permettait aux joueurs d'explorer différentes manières de frapper et favorisait le développement de stratégies motrices propres à chacun, même si cette approche n'entraîne pas forcément une performance immédiate supérieure. Dans le même esprit, Regan (2021) soutient que l'approche par contraintes, appliquée à l'enseignement du tennis, serait plus efficace qu'une approche fondée sur la transmission explicite d'un modèle technique idéal accompagnée d'un feedback verbal externe. Il a aussi proposé un cadre pour exploiter cette approche dans la recherche de solutions motrices, y compris dans le cas du service.

Certains entraîneurs de haut niveau semblent déjà s'inscrire dans cette logique d'individualisation de la pratique. L'étude d'E. Anderson et al. (2021), portant sur les témoignages de dix entraîneurs experts, souligne l'importance d'adapter les contenus d'entraînement aux besoins, aux caractéristiques et aux préférences de chaque joueur. L'un d'eux déclare ainsi : « Vous concevez l'entraînement autour du joueur : l'âge, les capacités, la volonté, le type de morphologie, le classement, le tournoi... .» Un autre entraîneur déclare : « Plus j'ai de l'expérience en tant qu'entraîneur, plus je réalise que la réponse à la plupart des questions, c'est : ça dépend vraiment. Et tout devrait être aussi spécifique que possible à chaque joueur, dans tous les aspects. » Ces entraîneurs rapportent également divers leviers d'individualisation, tels que la conception de tâches adaptées aux objectifs de développement, l'ajustement de leur style de coaching pour favoriser la réflexion du joueur, ou encore la manipulation ciblée des contraintes selon le style de jeu (E. Anderson et al., 2021).

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Chapitre 3

Synthèse et objectifs

3.1 Synthèse

Cette revue de littérature a permis de mettre en évidence que le service est l'un des coups les plus importants au tennis, car il conditionne, en grande partie, la performance globale du joueur et l'issue d'un match. Sur le plan biomécanique, il implique des coordinations motrices complexes, permettant aux joueurs de maîtriser différents indicateurs de performance, parmi lesquels la vitesse de balle occupe une place centrale. Celle-ci apparaît en effet de manière récurrente dans la majorité des travaux consacrés à l'analyse du service. La vitesse maximale de la tête de raquette est également considérée comme un paramètre déterminant, puisqu'elle conditionne directement la vitesse de balle, et fait à ce titre l'objet d'une attention particulière dans les études biomécaniques du service. Toutefois, la performance au service ne se résume pas à la seule production de vitesse. Elle s'inscrit dans une dynamique multifactorielle où interviennent aussi des dimensions telles que la précision ou la capacité à atteindre des zones cibles dans le carré de service, permettant de mettre l'adversaire en difficulté. Cette capacité semble être favorisée par un point d'impact balle–raquette situé plus haut. Malgré cela, une grande partie des études s'est concentrée quasi exclusivement sur la vitesse de balle, au détriment des autres indicateurs qui contribuent pourtant à une performance de service complète.

L'analyse des paramètres cinématiques du service permet de mieux comprendre les mécanismes biomécaniques qui influencent les indicateurs de performance. Un large consensus se dégage dans la littérature quant au rôle central joué par la production de vitesses angulaires élevées et l'enchaînement proximo-distal, qui contribuent à maximiser les vitesses linéaires et angulaires transmises à la raquette et donc à la balle. Le rôle du membre supérieur dominant (via la rotation interne de l'épaule, l'extension du coude, la flexion et la pronation du poignet) et celui des membres inférieurs (via la « triple extension » des chevilles, des genoux et des hanches, les forces de réaction au sol et l'élévation du centre de masse) est largement reconnu. Les rotations transverse et antéro-postérieure du tronc

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

sont elles aussi identifiées comme des facteurs influençant significativement la vitesse de balle et la hauteur d'impact. En revanche, d'autres paramètres, tels que les amplitudes de flexion des genoux ou certains aspects de la cinématique du tronc dans le plan transverse, semblent varier d'un joueur à l'autre et montrent des relations contrastées avec la performance. Ces éléments pourraient davantage refléter des stratégies motrices individuelles que des déterminants universels de la performance du service. Toutefois, la manière dont la variabilité inter-individuelle s'exprime chez les joueurs experts et les mécanismes qui la sous-tendent ont été très peu explorés dans la littérature.

Cette revue de littérature a également permis d'examiner l'influence des caractéristiques individuelles, telles que les paramètres anthropométriques, les capacités physiques ou encore le sexe, sur les indicateurs de performance et les paramètres biomécaniques mesurés au service. L'influence de la latéralité oculo-manuelle suscite beaucoup d'intérêt chez les entraîneurs, mais reste encore peu documentée et mérite d'être étudiée. Si la littérature a permis d'identifier de nombreux déterminants biomécaniques de la performance, elle interroge encore peu la manière dont cette performance peut être le fruit de différentes organisations motrices chez des joueurs pourtant experts, laissant en suspens la question de la variabilité inter-individuelle et des stratégies motrices associées, malgré l'émergence des théories dynamiques du contrôle moteur. En tennis, l'étude du service est encore souvent dominée par les conceptions des théories cognitives du contrôle moteur, en se basant sur une logique comparative entre des groupes de niveaux différents et/ou sur l'idée que les experts exécuteraient « la bonne technique » (Ericsson & Pool, 2016). Ces éléments peuvent en partie expliquer pourquoi les entraîneurs restent attachés à des modèles traditionnels de la technique de service, visant la reproduction d'un geste considéré comme « idéal » pour tous.

Dans cette thèse, nous proposons d'inscrire nos résultats dans un cadre explicatif fondé sur une approche systémique, en nous appuyant sur la théorie des systèmes dynamiques. Cette théorie permet de mieux comprendre le rôle des différentes contraintes (de l'organisme, de l'environnement et de la tâche) dans la variabilité observée et d'appréhender le service comme un système complexe en constante adaptation.

3.2 Objectifs de la thèse

L'objectif de cette thèse est d'étudier la variabilité inter-individuelle des paramètres biomécaniques au service et d'identifier les stratégies motrices utilisées par les joueurs de

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

tennis experts pour atteindre une performance efficace. L'enjeu est de montrer que cette variabilité existe chez les joueurs de tennis experts, et qu'elle constitue une richesse issue de processus d'auto-organisation et des contraintes. Cette démarche vise à déconstruire le mythe d'un geste « unique » et « idéal » de service et à proposer une compréhension plus complète de ce mouvement dans le cadre des théories dynamiques du contrôle moteur. La finalité est d'offrir des pistes concrètes pour individualiser l'entraînement, d'enrichir l'observation des entraîneurs et de favoriser l'exploration motrice.

Pour répondre à cette problématique, différents paramètres cinématiques du service et plusieurs indicateurs de performance seront analysés. Concernant la performance, nous ne nous limiterons pas à la vitesse de balle mais nous tiendrons compte conjointement de la vitesse, de la hauteur d'impact et de la position antéro-postérieure de l'impact.

Sur le plan biomécanique, **l'étude 1** vise à analyser la variabilité inter-individuelle, d'une part, de la trajectoire du CoM, considérée à l'échelle globale du mouvement, et d'autre part, des angles de flexion et d'extension des genoux, analysés à une échelle plus locale, au cours des différentes phases du service.

Dans la continuité, **l'étude 2** utilisera une méthode de clustering appliquée aux données cinématiques continues de l'étude précédente dans le but de révéler des stratégies motrices communes à certains joueurs, dissimulées derrière la variabilité observée, et d'en caractériser les principales spécificités.

Les études 3 et 4 suivront une démarche similaire, en se focalisant cette fois sur les mouvements de rotation du tronc autour de l'axe longitudinal. Elles étudieront d'abord la variabilité inter-individuelle des paramètres associés à cette rotation, puis identifieront les stratégies motrices utilisées au service grâce à une autre méthode de clustering.

L'étude 5 explorera l'origine potentielle de cette variabilité en examinant les relations entre les paramètres cinématiques de la rotation longitudinale du tronc mesurés lors du service et ceux obtenus lors de tests fonctionnels de terrain (lancers de médecine ball et mesure de l'amplitude maximale de rotation du tronc).

Enfin, **L'étude 6** de cette thèse portera sur l'effet de la latéralité oculo-manuelle, qu'elle soit « homogène » ou « croisée » sur la biomécanique du service et sur les indicateurs de performance, en se focalisant plus particulièrement sur les mouvements de rotation du tronc dans le plan transverse.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Chapitre 4

Méthodologie générale

4.1 Déroulement

La phase d'expérimentation, permettant de recueillir les données, s'est déroulée sur une période de 3 ans. Les sessions ont eu lieu soit sur un court de tennis au sein de la plateforme Immermove du laboratoire M2S de l'Université Rennes 2, soit sur le court technologique du Centre National d'Entraînement (CNE) de la Fédération Française de Tennis. Les participants ont été recrutés dans deux cadres distincts :

— dans le cadre de l'axe 1 du projet BEST-Tennis, dont l'objectif était d'optimiser la performance au service et de réduire le risque de blessure grâce à une analyse biomécanique du geste et à l'évaluation des préférences motrices naturelles des joueurs en vue d'une individualisation de l'entraînement

— dans le cadre de prestations d'accompagnement scientifique de joueurs de tennis de haut niveau souhaitant améliorer leur geste de service

Les expérimentations ont été menées conformément à la Déclaration d'Helsinki de 1975 et validées par le Comité de Protection des Personnes d'Île-de-France I (Paris, France ; code d'approbation : 2021-A02133-38 ; date d'approbation : 15 décembre 2021) dans le cadre du projet BEST-Tennis. Tous les participants ont donné leur consentement éclairé par écrit.

4.2 Capture de mouvement en 3D

La méthodologie de capture de mouvements lors du service décrite dans ce chapitre a été utilisée pour l'ensemble des études présentées dans cette thèse. Les hommes portaient uniquement un short et des chaussures de tennis alors que les femmes (incluses uniquement dans l'étude 6) portaient également une brassière. Chaque joueur a été équipé de 43 marqueurs réfléchissants (14 mm de diamètre) (Figure 4.1), placés sur des repères anato-

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

miques spécifiques, conformément aux recommandations de la littérature (Leardini et al., 1999 ; Reed et al., 1999 ; Zatsiorsky et al., 1990) (Tableau 4.1).

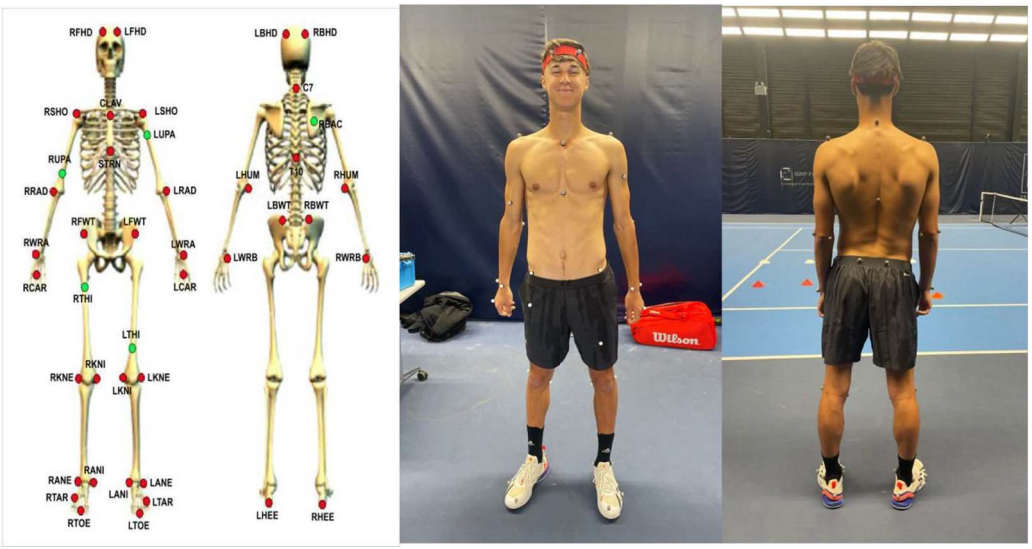


FIGURE 4.1 – Modèle de placement des marqueurs sur le joueur

Parmi ces marqueurs, cinq marqueurs dits « dissymétriques », indiqués en vert sur la figure, ont été spécifiquement placés pour faciliter la reconnaissance entre les côtés gauche et droit du corps. Cinq marqueurs supplémentaires ont également été placés sur la raquette : à l'extrémité du manche, sur le cœur, la tête, ainsi que sur les côtés gauche et droit du tamis (Figure 4.2) (Martin, Bideau, Ropars et al., 2014). Un modèle mathématique a ensuite été utilisé, regroupant 15 segments (la raquette et 14 segments corporels : tête, tronc, avant-bras, bras, mains, cuisses, jambes, pieds) afin de déterminer la position du centre de masse du joueur en utilisant la table anthropométrique de De Leva (1996). Enfin, quatre morceaux de scotch réfléchissants supplémentaires ont été fixés sur la balle pour déterminer précisément le moment de l'impact.

4.3 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. Ensuite, chaque joueur a réalisé 5 services « à plat » (c'est-à-dire avec précision, vitesse et avec le moins d'effet possible)

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Marqueurs	**Repères anatomiques**
RFHD, LFHD	– Os frontaux droit et gauche
RBHD, LBHD	– Os occipitaux droit et gauche
C7	– Processus épineux de la 7^{e} vertèbre cervicale
T10	– Processus épineux de la 10^{e} vertèbre thoracique
CLAV	– Incisure jugulaire du sternum
STRN	– Processus xiphoïde
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 droit et gauche
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	– Processus métacarpiens 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 fémoraux latéraux droit et gauche
RKNI, LKNI	– Condyles fémoraux médiaux 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

TABLE 4.1 – Repères anatomiques pour le placement des marqueurs sur le corps du joueur

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

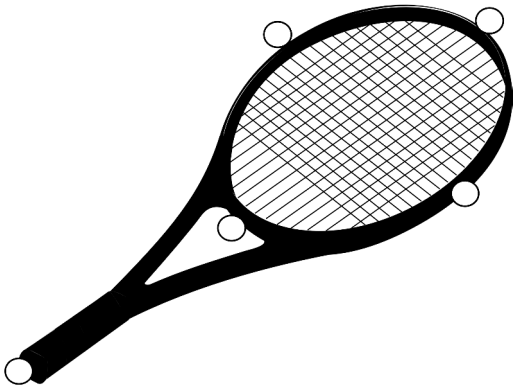


FIGURE 4.2 – Modèle de placement des marqueurs sur la raquette, d'après Martin, Bideau, Ropars et al. (2014)

dans une zone au « T » d'1 m sur 2 m, dans la diagonale des égalités pour les droitiers ou dans la diagonale des avantages pour les gauchers (Figure 4.3). Ce protocole est en accord avec les recommandations de la littérature qui stipule que l'analyse d'au moins 3 services est nécessaire pour obtenir une représentation précise du mouvement de service (Mullineaux et al., 2001). Afin de s'assurer de la qualité des mouvements capturés et du confort des participants face à la situation expérimentale, chacun d'entre eux a réalisé l'expérimentation avec sa raquette personnelle (Martin, Bideau, Ropars et al., 2014 ; Rogowski et al., 2011 ; Whiteside et al., 2013b). Les trajectoires 3D des marqueurs ont été enregistrées à une fréquence d'acquisition de 300 Hz à l'aide d'un système de capture du mouvement Qualisys, équipé de 23 caméras optoélectroniques (Oqus 7+, Qualisys AB, Göteborg, Suède). L'origine du système de coordonnées était située au centre de la ligne du fond de court : l'axe X positif s'étendait vers la droite, l'axe Y positif pointait vers le filet et l'axe Z positif s'orientait vers le haut. La vitesse de balle de chaque service a été mesurée grâce à un radar (Pro II+, Stalker Professional Sports Radar, Applied Concepts, Plano, Texas, USA ; précision : ± 1,6 km/h, fréquence : 34,7 GHz, temps d'acquisition : 0,01 s) fixé sur un trépied et placé 2 mètres derrière chaque participant. La hauteur du radar sur le trépied a été ajustée en fonction de la taille de chaque sujet.

A l'issue de la session de capture, les coordonnées 3D des marqueurs ont été reconstruites à l'aide du logiciel Qualisys Track Manager (QTM, Qualisys AB, Göteborg, Suède), avec une erreur résiduelle inférieure à 1 mm (Figure 4.4). Une fois la reconstruction terminée, les coordonnées des trajectoires des marqueurs ont été exportées dans un fichier au format « C3D », puis transférées vers Matlab (version R2018a, MathWorks, Natick,

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Massachusetts, États-Unis) pour permettre leur traitement. Les données de coordonnées 3D des marqueurs positionnés sur le corps et de la raquette ont été filtrées à l'aide d'un filtre passe-bas avec une fréquence de coupure de 20 Hz.

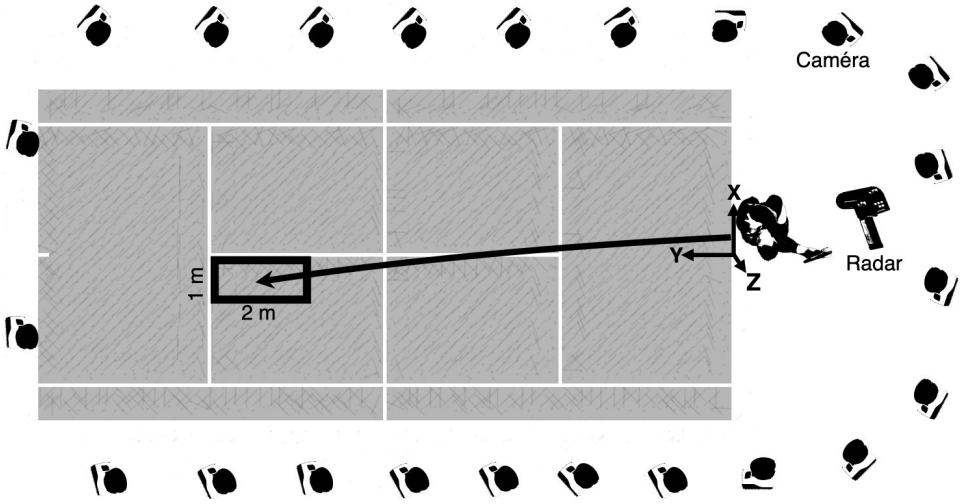


FIGURE 4.3 – Représentation schématique du protocole expérimental pour un joueur droitier

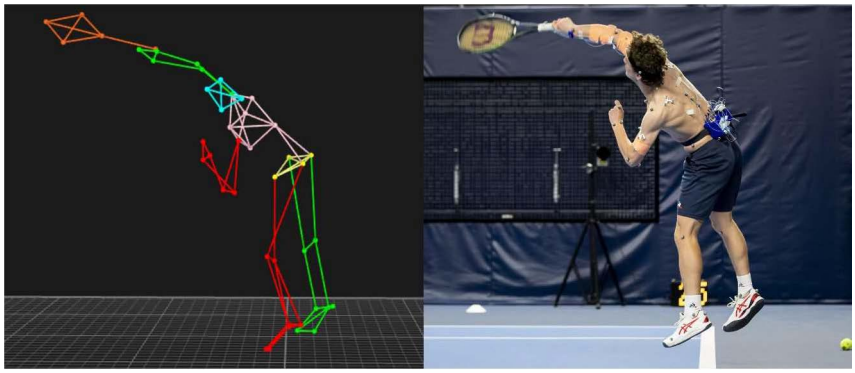


FIGURE 4.4 – Reconstruction de la position 3D des marqueurs à l'aide du logiciel Qualisys Track Manager

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Chapitre 5

Variabilité inter-individuelle et stratégies motrices liées à la cinématique du centre de masse et des genoux

5.1 Étude 1 : Variabilité inter-individuelle de la cinématique du centre de masse et des genoux lors du service de joueurs de tennis professionnels

5.1.1 Introduction

Pendant plusieurs décennies, les entraîneurs ont suivi le paradigme du « modèle de mouvement optimal », postulant l'existence d'une technique « unique » et « idéale » permettant de maximiser la performance. Dans ce contexte, la variabilité inter-individuelle était traditionnellement interprétée comme une déviation par rapport à ce modèle optimal et donc considérée comme indésirable (Brisson & Alain, 1996 ; Davids et al., 2003). Cependant, des études récentes ont montré que la variabilité du mouvement pouvait au contraire constituer une caractéristique fonctionnelle des experts, reflétant leur capacité d'adaptation (Glazier & Lamb, 2017 ; Seifert et al., 2011). Cette perspective s'inscrit dans le cadre théorique des systèmes dynamiques, selon lequel le mouvement émerge des interactions entre les contraintes propres à l'individu, celles de la tâche et celles de l'environnement (Newell, 1986). Dès lors, les stratégies motrices individuelles sont considérées comme des solutions plutôt que comme des déviations d'un modèle normatif.

En conséquence, l'analyse de la variabilité inter-individuelle est devenue un domaine de recherche important en biomécanique (Bartlett et al., 2007). En effet, plusieurs études

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

ont mis en évidence son rôle fonctionnel dans la performance pour différents gestes sportifs tels que le squat, la brasse, le swing au golf et le coup droit au tennis de table (Bańkosz & Winiarski, 2020 ; Glazier & Lamb, 2017 ; Kristiansen et al., 2019 ; Seifert et al., 2011). Il a aussi montré que le niveau de variabilité inter-individuelle peut varier selon les phases du mouvement. Par exemple, pour le tir au basket-ball, la variabilité de la cinématique de l'épaule est plus élevée pendant la phase descendante (aussi appelée phase de préparation) et plus faible pendant la phase ascendante (phase d'accélération) (Ae, 2020).

En revanche, les travaux portant spécifiquement sur la variabilité inter-individuelle lors du service sont limités. Si Kovacs et Ellenbecker (2011b) ont suggéré que c'est au début du service que s'observent le plus facilement les styles et les stratégies motrices individuelles, Whiteside et al. (2015) ont démontré que les joueuses professionnelles réduisent la variabilité des mouvements des membres inférieurs et du tronc au cours de la phase d'armée alors que la variabilité de la rotation de l'avant-bras lors de la pronation augmente à la fin de l'accélération. Cette augmentation a été interprétée comme le signe d'un mécanisme compensatoire visant à assurer un contact adéquat entre la raquette et la balle. Par ailleurs, d'importantes variations inter-individuelles au niveau des angles de flexion des genoux et de la trajectoire du CoM semblent exister durant la phase de préparation (Brito et al., 2024 ; Jacquier-Bret & Gorce, 2024b). Toutefois, à ce jour, la variabilité inter-individuelle des paramètres cinématiques des genoux et du CoM n'a jamais été investiguée en profondeur, en particulier en lien avec la performance au service.

Pourtant, ces paramètres jouent un rôle central au cours des phases de préparation et d'accélération (Kovacs & Ellenbecker, 2011b). Les actions des genoux sont impliquées au départ de la chaîne cinématique proximo-distale (Girard et al., 2005). Elles influencent directement les paramètres verticaux (trajectoire et vitesse) du centre de masse (CoM), qui constitue un indicateur global du mouvement et offre une synthèse fonctionnelle de la cinématique du corps dans son ensemble (Kipp & Kim, 2020 ; Lin et al., 2003 ; Ws, 2018). Or, la majorité des études ayant décrit la cinématique du CoM et des genoux se sont focalisées sur des données discrètes moyennées à l'échelle de groupes (Brito et al., 2024 ; Elliott, Reid & Crespo, 2003 ; Fleisig et al., 2003 ; Hornestam et al., 2021 ; Liang et al., 2023 ; Whiteside et al., 2013b). De telles approches ont sans doute contribué à renforcer les modèles techniques normatifs dans les pratiques d'entraînement (E. Anderson et al., 2021 ; Fetisova, 2021). À titre d'exemple, certaines interviews rapportent que des entraîneurs recherchent systématiquement chez leurs joueurs une flexion maximale des genoux proche de 110° (Fetisova, 2021).

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Enfin, les entraîneurs déplorent une compréhension encore limitée des mécanismes qui lient l'action des jambes et la performance (Lester et al., 2023) en raison de résultats scientifiques parfois contradictoires. Si Girard et al. (2007) et Hornestam et al. (2021) ont montré que la flexion maximale des genoux influençait la vitesse de la balle ou de la raquette, ce n'est pas le cas de Brito et al. (2024). De leur côté, Liang et al. (2023) ont montré qu'une flexion plus importante des jambes était associée à une plus grande hauteur de décollage. Malheureusement, cette étude n'a mesuré ni la vitesse de la balle, ni la hauteur d'impact. Fourel et al. (2024) ont mis en évidence que la vitesse verticale du CoM, mesurée au cours de la phase d'accélération, était significativement corrélée à la hauteur d'impact et à la vitesse maximale de tête de raquette. De leur côté, Brito et al. (2024) ont démontré que les joueurs les plus performants présentaient un déplacement vertical du CoM plus important, uniquement en fin de phase d'armée, sans effet apparent des autres phases.

Dans ce contexte, la présente étude a pour objectif d'évaluer la variabilité inter-individuelle du mouvement de service à deux niveaux complémentaires : d'une part, à une échelle locale, en se focalisant sur les paramètres cinématiques des genoux, et d'autre part, à une échelle globale, à travers l'analyse des paramètres verticaux du CoM. Elle vise également à examiner les relations entre ces paramètres et deux indicateurs clés de la performance au service : la vitesse maximale de la tête de raquette et la hauteur d'impact.

Nous émettons les hypothèses spécifiques suivantes :

— Le niveau de variabilité inter-individuelle varie en fonction des différentes phases du service. Plus précisément, les paramètres cinématiques des genoux et du CoM mesurés durant la phase de préparation présentent une plus grande variabilité inter-individuelle que ceux mesurés lors de la phase d'accélération.

— Seuls les paramètres cinématiques du CoM et des genoux mesurés lors de la phase d'accélération sont significativement corrélés aux indicateurs de performance.

De façon générale, nous supposons que la phase de préparation offre une plus grande liberté d'expression de stratégies motrices individuelles sans compromettre la performance, tandis que la phase d'accélération est davantage contrainte par les exigences fonctionnelles de la tâche.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

5.1.2 Méthodologie spécifique à l'étude

5.1.2.1 Participants

Les analyses de puissance ont révélé que la taille minimale de l'échantillon pour obtenir une puissance statistique d'au moins 0,80, avec un alpha de 0,05 et un coefficient de corrélation de 0,75, était de 11 participants pour une corrélation de Pearson et de 14 pour une corrélation de Spearman. Au total 22 joueurs de tennis professionnels (19 droitiers et 3 gauchers ; âge : 22,8 ± 3,5 ans ; taille : 1,89 ± 0,08 m ; masse corporelle : 80,2 ± 7,8 kg), avec un classement ATP moyen de 231 (le mieux classé était 17^{e}, le moins bien classé était 565^{e}), ont volontairement participé à l'étude. Tous les participants ont servi en utilisant leur technique habituelle de relais d'appuis, où le pied arrière rejoint le pied avant, avant de pousser contre le sol. Aucun des participants ne présentait de blessure, ni de douleur susceptible d'affecter sa performance au service.

5.1.2.2 Capture de mouvement en 3D et protocole expérimental

La méthodologie et le protocole de capture du service en 3D utilisés pour cette étude sont décrits dans le chapitre 4.

5.1.2.3 Indicateurs de performance

La vitesse maximale absolue de la tête de raquette et la hauteur d'impact entre la balle et la raquette ont été analysées en tant qu'indicateurs de la performance. La hauteur d'impact a été normalisée par la taille de chaque joueur.

5.1.2.4 Phases analysées pour l'étude de la variabilité inter-individuelle du CoM

Le service a été divisé en deux phases : la phase de préparation et la phase d'accélération. La phase d'accompagnement, qui suit l'impact entre la balle et la raquette, n'a pas été incluse dans notre analyse, car elle n'est généralement pas considérée comme une phase active du mouvement de service. La phase de préparation débute au moment où le CoM atteint sa position verticale maximale, c'est à dire lorsque sa vitesse verticale est nulle pour la première fois, généralement à l'approche du moment du lancer de balle (LB). Elle se termine lorsque le CoM atteint sa position verticale minimale, généralement à l'approche du passage de la raquette en position armée. La phase d'accélération com-

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

mence à la fin de la phase de préparation et se termine lorsque le CoM atteint à nouveau sa position la plus haute, à l'approche de l'impact balle raquette (IMP)(Figure 5.1). Pour tracer les courbes cinématiques d'intérêt, les données ont été interpolées et le temps a été normalisé entre le début de la phase de préparation et la fin de la phase d'accélération.

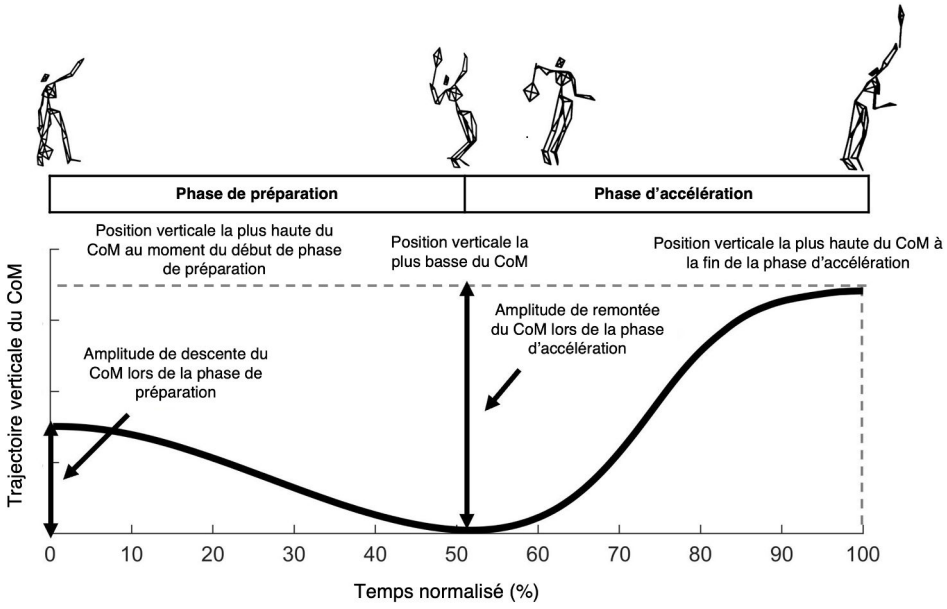


FIGURE 5.1 – Illustrations des instants clés, des phases du service et de certaines variables cinématiques étudiées pour le CoM

5.1.2.5 Phases analysées pour l'étude de la variabilité inter-individuelle du CoM

Pour analyser la variabilité inter-individuelle du CoM lors du service, un ensemble de variables cinématiques discrètes a été sélectionné (Figure 5.1). Ces variables comprennent :

- les positions verticales du CoM au début et à la fin des phases de préparation et d'accélération
- les amplitudes de descente et de remontée du CoM au cours de chacune de ces phases (normalisées en fonction de la taille du joueur afin de permettre des comparaisons inter-individuelles)
- les vitesses verticales maximales de descente et de remontée du CoM
- les durées des phases de préparation et d'accélération

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Notre analyse s'est principalement concentrée sur les variables cinématiques du CoM dans le plan vertical, car les phases de préparation et d'accélération du service sont principalement définies par les mouvements verticaux du corps du joueur (Bahamonde & Knudson, 2001). Les données ont été extraites pour chaque service, puis la moyenne de chaque variable cinématique a été calculée à partir des 5 essais réussis par chaque joueur.

5.1.2.6 Variables d'intérêt pour l'étude de la cinématique des genoux

Les angles internes de flexion des genoux avant et arrière ont été calculés au cours d'une séquence temporelle comprise entre le début de la flexion de chaque genou et le moment de l'impact. Cette séquence temporelle différait pour le genou avant et le genou arrière, dans la mesure où les instants de début de flexion du genou arrière et du genou avant ne coïncident pas entre les deux jambes. Pour analyser la variabilité inter-individuelle du mouvement des genoux lors du service, les variables cinématiques discrètes suivantes ont été sélectionnées :

— les angles internes de flexion des genoux au début de la flexion et à l'impact

— les angles internes de flexion maximale des genoux

— les amplitudes de flexion et d'extension des genoux

— les vitesses angulaires maximales de flexion et d'extension des genoux,

— les durées des phases de flexion et d'extension des genoux

Toutes ces variables ont été calculées pour chaque service, puis moyennées sur les 5 essais réussis par chaque joueur.

5.1.2.7 Analyses statistiques

Les moyennes et les écarts-types ont été calculés pour toutes les variables cinématiques et les indicateurs de performance. Le test de Shapiro-Wilk a été utilisé pour évaluer la normalité des distributions des données. La variabilité inter-individuelle a été quantifiée à l'aide du coefficient de variation (CV), défini comme le rapport de l'écart-type à la moyenne, exprimé en pourcentage. Conformément aux seuils proposés par Bańkosz et Winiarski (2020), un CV inférieur à 20 % a été interprété comme une faible variabilité, un CV compris entre 20 % et 40 % comme une variabilité modérée, un CV compris entre 40 % et 60 % comme une variabilité élevée, et un CV supérieur à 60 % comme une variabilité très élevée. Lorsque les données ne suivaient pas une distribution normale, mais une distribution log-normale, le CV a été calculé selon la formule suivante :

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

$$CV = \sqrt{e^s - 1}, \tag{5.1}$$

où s est la variance du logarithme népérien (ln) des données.

Les CV des angles des genoux n'ont pas été calculés, car leurs valeurs peuvent varier en fonction de la méthode utilisée pour le calcul de chaque angle (interne ou externe). Afin de vérifier que la variabilité observée entre les joueurs était principalement due à des différences inter-individuelles, et non à la variabilité intra-individuelle résultant des 5 services réussis, nous avons également mesuré la variabilité intra-individuelle. Pour ce faire, nous avons calculé la moyenne des CV pour chaque joueur à partir des 5 services réalisés.

Des coefficients de corrélation de Pearson ont permis d'évaluer les relations entre les variables du CoM et les indicateurs de performance au service (vitesse maximale de la tête de raquette et hauteur d'impact), ainsi qu'entre les variables cinématiques des genoux et ces mêmes indicateurs. Lorsque l'hypothèse de normalité n'a pas été vérifiée, des coefficients de corrélation de Spearman ont été utilisés. Conformément aux seuils couramment appliqués dans la littérature, les coefficients de corrélation ont été interprétés comme faibles pour des valeurs comprises entre 0,25 et 0,50, modérés entre 0,50 et 0,75, et forts pour des valeurs supérieures à 0,75 (Portney & Watkins, 2015). Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Statistica (Statistica 12, Statsoft Inc., Tulsa, USA). Le niveau de significativité a été fixé à $p = 0{,}05$ et ajusté à $p = 0{,}0028$ (0,05/18) à l'aide d'une correction de Bonferroni pour contrôler l'erreur de type I.

5.1.3 Résultats

5.1.3.1 Indicateurs de performance

Nos résultats montrent une faible variabilité inter-individuelle pour la vitesse maximale de la tête de raquette et la hauteur d'impact de la balle (CV : 5,3 % et 1,8 %, respectivement) (Tableau 5.1), ce qui témoigne de l'homogénéité des performances au sein de notre population.

5.1.3.2 Variabilité inter-individuelle des paramètres cinématiques du CoM

La Figure 5.2 illustre les trajectoires et les vitesses verticales du CoM obtenues pour chaque joueur. La variabilité inter-individuelle des positions verticales du CoM, mesurées

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

	Moyenne	**ET**	**CV inter (%)**	**CV intra (%)**
Vitesse maximale de la tête de raquette ($m \cdot s^{-1}$)	47,5	2,5	5,3	1,4
Hauteur d'impact (% de la taille)	147,6	2,6	1,8	0,7

TABLE 5.1 – Données descriptives et coefficients de variation de la vitesse maximale de la tête de raquette et de la hauteur d'impact. ET : écart-type ; CV inter : coefficient de variation inter-individuelle ; CV intra : coefficient de variation intra-individuelle calculé pour l'évaluation de la variabilité intra-individuelle à partir des 5 services réussis.

au début et à la fin de la phase de préparation et à la fin de la phase d'accélération, était faible (CV : 4,0 %, 3,8 % et 3,2 %, respectivement) (Tableau 5.2). En revanche, la variabilité inter-individuelle de l'amplitude de descente du CoM pendant la phase de préparation était élevée (CV : 41,6 %), tandis que celle de l'amplitude de remontée du CoM pendant la phase d'accélération était modérée (CV : 21,3 %). La variabilité inter-individuelle de la vitesse linéaire maximale de descente du CoM, observée lors de la phase de préparation, était supérieure à celle de la vitesse linéaire maximale de remontée du CoM mesurée durant la phase d'accélération (CV : 42,2 % *vs.* 14,6 %, respectivement). Enfin, la variabilité inter-individuelle de la durée de la phase de préparation était plus élevée que celle de la phase d'accélération (CV : 20,7 % *vs.* 18,5 %, respectivement). Pour l'ensemble des variables, la variabilité inter-individuelle était environ 4 à 20 fois plus élevée que la variabilité intra-individuelle correspondante (Tableau 5.2).

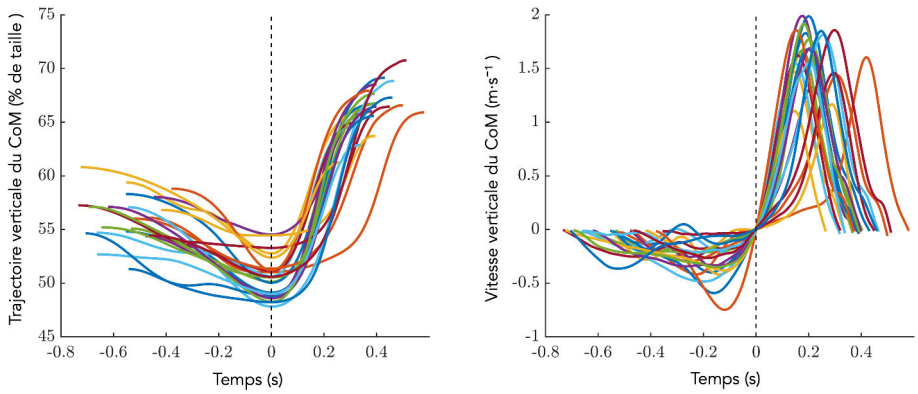


FIGURE 5.2 – Positions verticales du CoM normalisées par la taille des joueurs (à gauche) et vitesses verticales du CoM (à droite). Chaque courbe représente la moyenne des 5 services d'un joueur. Le temps est exprimé en valeur absolue à partir de la position la plus basse du CoM (ligne pointillée).

	Moyenne	ET	CV inter (%)	CV intra (%)
Positions verticales du CoM (exprimées en % de la taille)				
Position verticale la plus haute du CoM au début de la phase de préparation	56,1	2,2	4,0	0,4
Position verticale la plus basse du CoM au début de la phase d'accélération	50,6	1,9	3,8	0,8
Position verticale la plus haute du CoM à la fin de la phase d'accélération	66,3	2,1	3,2	1,0
Amplitudes verticales du CoM (exprimées en % de la taille)				
Amplitude de descente du CoM lors de la phase de préparation	–5,5	2,3	41,6	8,6
Amplitude de remontée du CoM lors de la phase d'accélération	15,8	3,4	21,3	5,7
Vitesses verticales maximales de CoM ($m \cdot s^{-1}$)				
Vitesse maximale de descente du CoM lors de la phase de préparation	–0,3	0,1	42,2	10,3
Vitesse maximale de remontée du CoM lors de la phase d'accélération	1,7	0,2	14,6	3,3
Durées (s)				
Durée de la phase de préparation	0,56	0,12	20,7	5,4
Durée de la phase d'accélération	0,40	0,07	18,5	4,9

TABLE 5.2 – Données descriptives des paramètres cinématiques du CoM, de la durée des phases et coefficients de variation inter et intra-individuelle. ET : écart-type ; CV inter : coefficient de variation inter-individuelle ; CV intra : coefficient de variation calculé pour l'évaluation de la variabilité intra-individuelle à partir de 5 services réussis ; CoM : centre de masse.

5.1.3.3 Variabilité inter-individuelle des paramètres cinématiques des genoux

Les angles de flexion des genoux avant et arrière sont présentés dans le Tableau 5.3. Les données descriptives des autres paramètres cinématiques relatifs aux genoux (amplitudes, vitesses et durées), ainsi que les coefficients de variation inter- et intra-individuels correspondants, sont reportés dans le Tableau 5.4. La Figure 5.3 présente l'évolution des angles internes aux genoux pour chaque joueur du début de la flexion jusqu'à l'impact.

L'amplitude angulaire était plus variable en flexion qu'en extension pour les deux genoux (genou arrière : CV inter = 21,8 % *vs.* 9,0 % ; genou avant : CV inter = 22,3 % *vs.* 16,6 %, respectivement). Le même résultat a été observé pour la vitesse angulaire maximale du genou arrière, dont la variabilité inter-individuelle était plus élevée en flexion qu'en extension (CV inter = 22,8 % *vs.* 12,1 %, respectivement). En revanche, les valeurs de CV inter obtenues pour la vitesse angulaire maximale du genou avant sont très proches entre les phases de flexion et d'extension (CV inter = 24,9 % *vs.* 26,9 %, respectivement). Par ailleurs, la durée de la flexion présentait une plus grande variabilité inter-individuelle que celle de l'extension (genou arrière : CV inter = 38,1 % *vs.* 16,6 % ; genou avant : CV inter = 30,4 % *vs.* 19,2 %, respectivement). Enfin, la variabilité inter-individuelle pour l'ensemble des variables était environ 3 à 20 fois plus élevée que la variabilité intra-individuelle correspondante (Tableau 5.4).

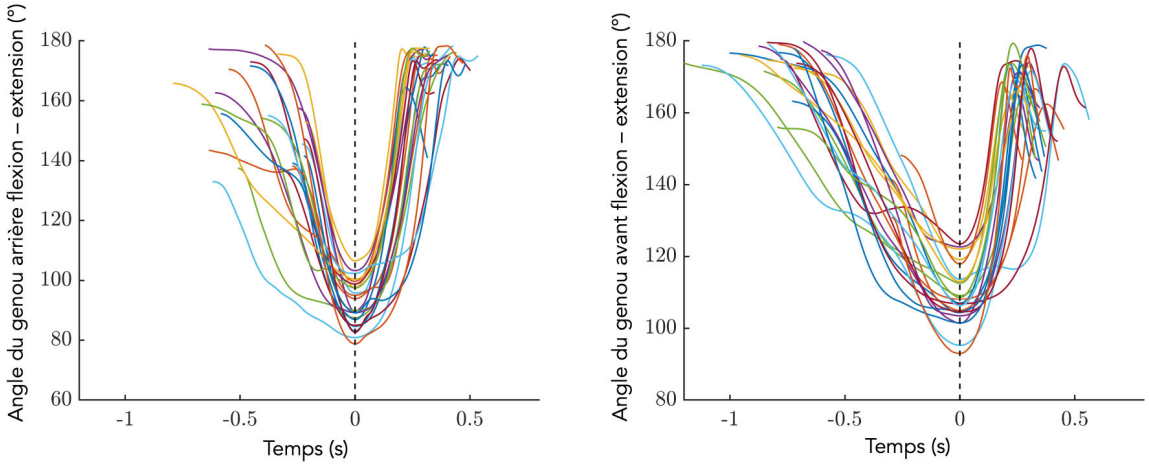


FIGURE 5.3 – Évolution de l'angle du genou arrière (à gauche) et du genou avant (à droite), du début de la flexion jusqu'à l'impact. Chaque courbe représente la moyenne des 5 services d'un joueur. Afin de mieux visualiser les durées de flexion et d'extension, le temps a été normalisé en valeurs absolues, à partir du moment où l'angle du genou atteint son minimum (ligne pointillée).

	Genou arrière		Genou avant	
	Moyenne ± ET	**[Min ; Max]**	**Moyenne ± ET**	**[Min ; Max]**
Angle interne du genou au début de la flexion (°)	155,4 ± 14,4	[133,0 ; 178,6]	170,1 ± 13,3	[130,9 ; 179,8]
Angle interne du genou à la flexion maximale (°)	91,8 ± 7,7	[78,4 ; 106,1]	108,8 ± 8,1	[93,1 ; 123,3]
Angle interne du genou à l'impact (°)	172,6 ± 7,7	[140,8 ; 178,4]	154,8 ± 8,3	[141,6 ; 177,9]

TABLE 5.3 – Données descriptives des angles des genoux avant et arrière. ET : écart-type ; Min : valeur minimale ; Max : valeur maximale.

	Genou arrière			Genou avant		
	Moyenne ± ET	**CV inter (%)**	**CV intra (%)**	**Moyenne ± ET**	**CV inter (%)**	**CV intra (%)**
Amplitude de flexion du genou (°)	63,6 ± 13,9	21,8	3,8	61,5 ± 13,7	22,3	2,6
Amplitude d'extension du genou (°)	83,8 ± 7,6	9,0	2,2	63,3 ± 10,5	16,6	4,2
Vitesse maximale de flexion du genou ($° \cdot s^{-1}$)	362,9 ± 82,6	22,8	7,9	202,4 ± 55,1	24,9	7,1
Vitesse maximale d'extension du genou ($° \cdot s^{-1}$)	668,4 ± 81,0	12,1	4,8	584,5 ± 157,2	26,9	6,1
Durée de flexion du genou (s)	0,473 ± 0,180	38,1	8,2	0,810 ± 0,246	30,4	5,3
Durée de l'extension du genou jusqu'à l'impact (s)	0,388 ± 0,066	17,0	5,9	0,395 ± 0,076	19,2	5,2

TABLE 5.4 – Données descriptives des paramètres cinématiques des genoux avant et arrière et leurs coefficients de variation. ET : écart-type ; CV inter : coefficient de variation inter-individuelle ; CV intra : coefficient de variation intra-individuelle.

5.1.3.4 Relation entre les variables cinématiques et les indicateurs de performance

Aucune corrélation significative entre les paramètres cinématiques du CoM et les indicateurs de performance au service n'a été observée lors de la phase de préparation (Tableau 5.5). En revanche, 4 corrélations significatives ont été identifiées entre les variables du CoM mesurées lors de la phase d'accélération et la hauteur d'impact. La hauteur d'impact était négativement corrélée à la position verticale minimale du CoM au début de la phase d'accélération ($r = -0,65$,p$< 0,001$). Elle était également corrélée positivement à la position verticale maximale du CoM en fin de phase d'accélération ($r = 0,78$,p$< 0,001$), à l'amplitude de remontée du CoM ($r = 0,87, p < 0,001$), ainsi qu'à la vitesse linéaire maximale de remontée du CoM ($r = 0,79$,p$< 0,001$).

	Vitesse maximale de la tête de raquette ($\mathbf{m \cdot s^{-1}}$)	**Hauteur d'impact (% de taille)**
Position verticale la plus haute du CoM au début de la phase de préparation	$-0,49$	$-0,37$
Position verticale la plus basse du CoM au début de la phase d'accélération	$-0,11$	$\mathbf{-0,65}^*$
Position verticale la plus haute du CoM à la fin de la phase d'accélération	$-0,17$	$\mathbf{0,78}^*$
Amplitude de descente du CoM lors de la phase de préparation	$-0,31$	$0,20$
Amplitude de remontée du CoM lors de la phase d'accélération	$-0,01$	$\mathbf{0,87}^*$
Vitesse maximale de descente du CoM lors de la phase de préparation	$0,19$	$-0,10$
Vitesse maximale de remontée du CoM lors de la phase d'accélération	$0,08$	$\mathbf{0,79}^*$
Durée de la phase de préparation	$0,01$	$0,07$
Durée de la phase d'accélération	$-0,13$	$0,16$

TABLE 5.5 – Coefficients de corrélation de Pearson et de Spearman entre les paramètres cinématiques du CoM et les indicateurs de performance. $^*p < 0,0028$.

Concernant les paramètres cinématiques des genoux, aucune corrélation significative n'a été observée avec les indicateurs de performance pour la phase de préparation (Tableau 5.6). En revanche, plusieurs paramètres de la phase d'accélération étaient significativement corrélés à la hauteur d'impact. L'angle de flexion maximale du genou arrière était négativement associé à la hauteur d'impact ($r = -0,70, p < 0,001$), tandis que l'amplitude d'extension du genou arrière présentait une corrélation positive significative

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

($r = 0,72, p < 0,001$). De même, pour le genou avant, l'angle de flexion maximale était négativement corrélé à la hauteur d'impact ($r = -0,62, p = 0,002$), et l'amplitude d'extension positivement corrélée ($r = 0,68, p < 0,001$). Aucune des variables cinématiques des genoux n'était significativement corrélée à la vitesse maximale de la tête de raquette.

	Vitesse maximale de la tête de raquette ($\mathbf{m \cdot s^{-1}}$)		**Hauteur d'impact (% de taille)**	
	Genou arrière	**Genou avant**	**Genou arrière**	**Genou avant**
Angle interne du genou au début de la flexion	$-0,05$	$-0,12$	$0,03$	$-0,18$
Angle interne du genou à la flexion maximale	$0,01$	$0,03$	$\mathbf{-0,70}^*$	$\mathbf{-0,62}^*$
Angle interne du genou à l'impact	$-0,16$	$0,26$	$-0,08$	$0,48$
Amplitude de flexion du genou	$0,01$	$-0,02$	$0,42$	$0,14$
Amplitude d'extension du genou	$0,02$	$0,11$	$\mathbf{0,72}^*$	$\mathbf{0,68}^*$
Vitesse maximale de flexion du genou	$0,31$	$0,38$	$0,22$	$0,26$
Vitesse maximale d'extension du genou	$-0,05$	$0,34$	$-0,07$	$0,57$
Durée de flexion du genou	$-0,41$	$-0,47$	$-0,12$	$-0,11$
Durée de l'extension du genou jusqu'à l'impact	$0,24$	$0,30$	$0,34$	$-0,19$

TABLE 5.6 – Coefficients de corrélation de Pearson et de Spearman entre les paramètres cinématiques des genoux et les indicateurs de performance. $^*p < 0,0028$.

5.1.4 Discussion

Les objectifs de cette étude étaient 1) d'évaluer la variabilité inter-individuelle des paramètres cinématiques du CoM et des genoux au cours du service, et 2) d'explorer la relation entre ces paramètres et deux indicateurs de performance : la vitesse maximale de la tête de raquette et la hauteur d'impact, chez des joueurs de tennis professionnels. Les résultats montrent que la variabilité inter-individuelle était supérieure pour :

- l'amplitude de déplacement vertical et la vitesse verticale maximale du CoM de la phase de préparation comparativement à la phase d'accélération
- la durée de la phase de préparation par rapport à celle de la phase d'accélération
- l'amplitude articulaire de flexion des genoux comparativement à celle d'extension
- la vitesse angulaire maximale de flexion du genou arrière comparativement à celle d'extension
- La durée de la phase de flexion des genoux comparativement à celle de la phase d'extension

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Ces différents résultats confirment notre première hypothèse, selon laquelle le niveau de variabilité inter-individuelle varie en fonction des différentes phases du service et s'avère plus important lors des phases de préparation et de flexion. Par ailleurs, conformément à notre seconde hypothèse, aucune corrélation significative n'a été observée entre les paramètres cinématiques du CoM ou des genoux mesurés lors de la phase de préparation et les indicateurs de performance.

5.1.4.1 Indicateurs de performance

Le CV inter obtenu pour la vitesse maximale de la tête de raquette est relativement faible (5,3 %), ce qui témoigne d'un niveau de performance homogène au sein du groupe étudié. Cette valeur est cohérente avec les résultats rapportés dans la littérature pour les joueurs professionnels (Reid et al., 2011). De même, la variabilité inter-individuelle de la hauteur d'impact est très faible (CV : 1,8 %), confirmant que cet indicateur est l'un des plus stables chez les joueurs professionnels. Cette stabilité apparaît comme un facteur fondamental de la performance de tous au service. En effet, frapper la balle à une hauteur élevée offre une plus grande marge de sécurité par rapport au filet, ce qui tend à optimiser le pourcentage de réussite et l'efficacité du service (Vaverka & Cernosek, 2013). La hauteur d'impact observée dans notre étude (147,6 ± 2,6 % de la taille) est par ailleurs très proche de celle rapportée par Reid et al. (2011) chez des joueurs professionnels (149 ± 6 % de la taille), ce qui renforce la validité de nos résultats.

5.1.4.2 Variabilité inter-individuelle des paramètres cinématiques du CoM et des genoux

Phases de préparation et de flexion : A l'échelle globale du mouvement, la plus grande variabilité inter-individuelle des paramètres cinématiques du CoM observée lors de la phase de préparation suggère que le début du mouvement de service est plus propice à l'expression de stratégies motrices différentes entre les joueurs. Toutefois, cette variabilité ne semble pas affecter la performance, puisque les paramètres du CoM mesurés durant cette phase ne montrent aucune corrélation significative avec la hauteur d'impact ou la vitesse maximale de la tête de raquette. De plus, la variabilité intra-individuelle reste faible durant cette phase, suggérant qu'elle ne contribue pas aux différences observées entre les joueurs. A une échelle d'analyse plus locale, centrée sur les paramètres cinématiques des genoux, le constat est similaire. Bien que la flexion des genoux soit un facteur nécessaire permettant aux joueurs de contracter de façon excentrique leurs quadriceps pour stocker

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

une certaine quantité d'énergie élastique (Girard et al., 2005), cette action présente une variabilité modérée durant la phase de préparation, notamment concernant les amplitudes de flexion et la durée de flexion pour les genoux avant et arrière. Cela suggère l'existence de stratégies motrices distinctes chez les joueurs quant à la manière de fléchir les genoux. La plus grande variabilité inter-individuelle observée lors des phases de préparation et de flexion soutient l'idée qu'il n'existe pas un seul modèle idéal de service à imiter au début du mouvement. Plutôt que de chercher à imposer une forme gestuelle standardisée, les entraîneurs gagneraient à tolérer – voire à encourager – une certaine diversité dans la manière dont les joueurs fléchissent les genoux et abaissent leur centre de masse au début du service. En termes d'apprentissage, il semblerait plus intéressant de favoriser l'exploration de différentes solutions motrices par les joueurs plutôt que de chercher à imposer le même modèle à tous. Des exercices introduisant de la variabilité dans la phase de préparation pourraient, par exemple, être développés par les entraîneurs pour aider les joueurs à trouver leur propre stratégie motrice.

Nos résultats montrent une corrélation négative significative entre la position verticale du CoM à la fin de la phase de préparation (au début de la phase d'accélération) et la hauteur d'impact balle-raquette. Autrement dit, plus le CoM est positionné bas à la transition vers la phase d'accélération, plus la hauteur d'impact tend à être élevée. De plus, des corrélations significatives ont été observées entre les angles de flexion maximale des genoux avant et arrière et la hauteur d'impact. Ces résultats nous amènent à résumer les phases de préparation et flexion de la façon suivante : quelle que soit la manière dont le joueur initie son service en termes de durée, de vitesse, d'amplitude de descente du CoM ou de flexion des genoux, l'objectif principal est d'amener le CoM suffisamment bas et les genoux suffisamment fléchis avant de pousser sur les jambes.

Phases d'accélération et d'extension : Lors de la phase d'accélération, l'amplitude de remontée du CoM et sa vitesse verticale maximale sont fortement corrélées à la hauteur d'impact et présentent une faible variabilité inter-individuelle. Un constat similaire est observé à un niveau plus local, avec des corrélations significatives et positives entre les amplitudes d'extension des genoux et la hauteur d'impact. Ces résultats indiquent donc que les phases d'accélération/d'extension sont déterminantes pour la performance et laissent peu de place à l'expression des stratégies motrices individuelle. Cela s'explique probablement par le fait que l'action de pousser vers le haut avec une vitesse linéaire maximale et une extension explosive des genoux pour atteindre la position la plus élevée du CoM, est directement liée aux exigences de la tâche du service. En effet, plus la hauteur

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

d'impact est élevée et plus la marge de sécurité par rapport au filet est importante. Nos résultats corroborent ceux de Whiteside et al. (2015) ayant observé une faible variabilité au niveau de la cinématique des membres inférieurs durant la phase d'accélération chez des joueuses de tennis. Ils confirment également l'importance du degré de flexion et de la vitesse d'extension des genoux pour augmenter la hauteur d'impact (Girard et al., 2007 ; Hornestam et al., 2021 ; Reid et al., 2008).

Sur le plan théorique, ces résultats s'inscrivent dans la perspective proposée par Seifert et al. (2013), selon laquelle les phases critiques du mouvement tendent à réduire la variabilité inter-individuelle et limitent les stratégies motrices des athlètes pour satisfaire aux exigences spécifiques de la tâche et aux contraintes de l'environnement. Bien que la phase d'accélération semble imposer une organisation motrice relativement commune à l'ensemble des joueurs, nos résultats montrent qu'une augmentation, même modérée, de la vitesse linéaire maximale du CoM vers le haut — probablement permise par une hausse de la vitesse d'extension des genoux et du degré de flexion — permet de gagner quelques centimètres supplémentaires dans la hauteur d'impact (Vaverka & Cernosek, 2013). Ces observations sont cohérentes avec celles de Fourel et al. (2024), qui ont montré que l'impulsion verticale nette relative ainsi que la vitesse verticale du CoM au moment du pic de puissance verticale constituent de bons prédicteurs de la hauteur d'impact au service.

En revanche, aucune des variables cinématiques du CoM et des genoux mesurées en phase d'accélération/extension n'est corrélée avec la vitesse maximale de la tête de raquette. Ces résultats soutiennent l'idée selon laquelle la composante verticale du geste de service ne constitue pas un facteur déterminant dans l'optimisation de la vitesse au service (Fourel et al., 2024). Ils confirment l'hypothèse selon laquelle les jambes jouent davantage un rôle de coordination et de propulsion du corps que de générateur de vitesse de la raquette au service (Colomar, Corbi, Brich & Baiget, 2022).

5.1.4.3 Interprétation des résultats à la lumière de la théorie des systèmes dynamiques

La théorie des systèmes dynamiques, selon laquelle la variabilité constitue un mécanisme permettant aux joueurs d'adapter leurs mouvements en réponse aux contraintes de de la tâche, de l'environnement et de l'organisme (Newell, 1986), fournit un cadre pertinent pour interpréter nos résultats. Dans notre étude, les contraintes liées à la tâche du service et à son environnement étaient constantes et identiques pour l'ensemble des joueurs. Elles comprenaient les dimensions traditionnelles du terrain (ligne de fond de court à 11,89 m

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

du filet) et de hauteur du filet (0,914 m), des instructions standardisées (le 1er service devait rebondir à l'intérieur d'une zone délimitée située au niveau du « T » du carré de service avec rapidité et précision) et l'environnement de laboratoire dans lequel les expérimentations se sont déroulées (court de tennis intérieur avec lumière artificielle, absence d'adversaire, absence de vent). En revanche, les contraintes liées à l'organisme de chacun varient bien évidemment entre les joueurs. Elles regroupent notamment les paramètres anthropométriques, la composition corporelle, l'architecture musculaire, les caractéristiques physiques spécifiques (force maximale, propriétés tendineuses des muscles, puissance neuromusculaire), ainsi que les préférences motrices et les modes de contraction préférentiels. Dans la littérature, l'impact des paramètres anthropométriques (telles que la taille, la masse corporelle et l'envergure des bras) et des caractéristiques physiques sur la performance au service a déjà été examiné (Colomar, Corbi, Brich & Baiget, 2022 ; Fett et al., 2020). En revanche, le rôle des préférences motrices et des modes de contraction préférentiels demeure encore peu exploré, alors même qu'ils pourraient contribuer à expliquer une partie de la variabilité inter-individuelle observée dans cette étude.

5.1.4.4 Interprétation des résultats à la lumière des préférences motrices et des modes de contraction préférentiels

L'analyse des préférences motrices s'est développée dans le domaine de la recherche en biomécanique au cours de ces dernières années (Hanley et al., 2022 ; Patoz et al., 2020). Plusieurs travaux ont montré que des individus présentant des niveaux de performance comparables peuvent mobiliser des organisations motrices distinctes. À titre d'exemple, chez les coureurs, les caractéristiques du cycle étirement–raccourcissement, et notamment la capacité à stocker et restituer l'énergie élastique, différent selon deux grands profils moteurs : un profil dit « aérien », associé à un fonctionnement davantage pliométrique, et un profil dit « terrien », reposant sur un mode de contraction plus concentrique (Lussiana et al., 2017). Nos résultats suggèrent également la présence de signatures motrices individuelles (Kelso, 1995), en particulier lorsque nous isolons les cas de deux joueurs professionnels qui pourraient refléter des stratégies motrices ou des modes de contraction préférentiels (Figure 5.4). Ils présentent des performances similaires en termes de vitesse maximale de la tête de raquette et de hauteur d'impact (écarts respectifs de 0,4 $m \cdot s^{-1}$ et 1,1 % d'écart). Tous deux atteignent également une amplitude verticale de remontée du CoM comparable (13,3 % *vs.* 13,2 % de leur taille), ainsi qu'une vitesse linéaire maximale ascendante similaire (1,49 *vs.* 1,47 $m \cdot s^{-1}$). Malgré ces similarités, leurs stratégies mo-

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

trices diffèrent nettement. Le joueur A semble adopter une stratégie typique d'un mode de contraction que l'on pourrait qualifier de fortement pliométrique (comportement cinématique du CoM semblable à un « ressort », avec une trajectoire en forme de « V »). À l'inverse, le joueur B semble présenter un mode de contraction pliométrique différent où la phase excentrique est beaucoup moins prononcée en termes d'amplitude (trajectoire en forme de « S »). Cette différence se manifeste également par une amplitude de descente du CoM plus importante chez le joueur A ($-6,6$ % de la taille) que chez le joueur B ($-0,6$ % de la taille), ainsi que par une vitesse maximale de descente du CoM environ quatre fois plus élevée ($-0,43$ *vs.* $-0,10$ m $\cdot$ s^{-1}). Ces résultats tendent à illustrer le concept d'équifinalité du mouvement qui stipule qu'une coordination motrice différente peut conduire au même résultat en termes de performance (Bańkosz & Winiarski, 2020 ; Müller & Loosch, 1999) et seront à confirmer dans l'étude suivante de cette thèse.

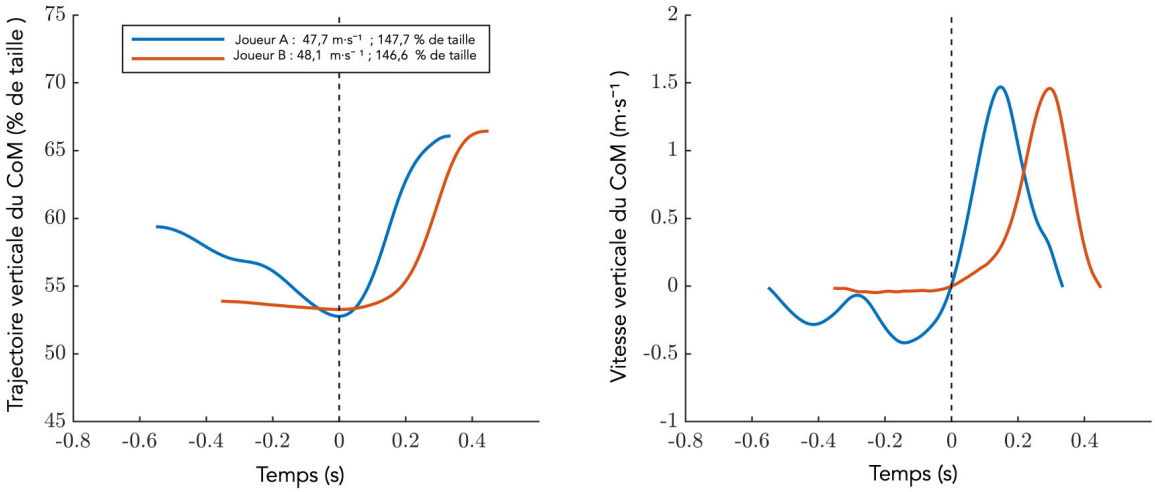


FIGURE 5.4 – Évolution de la position verticale du CoM, exprimée en pourcentage de la taille (à gauche), et évolution de la vitesse verticale du CoM (à droite), pour les services des joueurs A et B. Le temps est exprimé en valeurs absolues, à partir de la position la plus basse du CoM (ligne pointillée).

5.1.4.5 Applications pratiques pour les entraîneurs

Ces observations suggèrent qu'il serait nécessaire de concevoir des programmes d'entraînement et de préparation physique individualisés, respectant les stratégies motrices propres à chaque joueur en phase de préparation/flexion afin d'optimiser leur performance au service. De façon plus spécifique, les exercices choisis par les entraîneurs devraient être

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

conçus pour permettre aux joueurs d'explorer, de choisir puis de renforcer les stratégies motrices préférentielles de chacun. Enfin, compte tenu du fait que la hauteur du lancer de balle peut forcément contraindre la durée de la phase de préparation du service (Whiteside et al., 2015), nos résultats encouragent les entraîneurs à accorder une attention particulière à ce paramètre, notamment en l'ajustant aux stratégies motrices préférentielles des joueurs.

5.1.4.6 Limites et perspectives

Concernant les limites de notre étude, il convient de souligner que les capacités physiques de chaque joueur n'ont pas été évaluées. Or, ces données pourraient apporter un éclairage complémentaire sur les éléments pouvant être à l'origine de la variabilité inter-individuelle observée, notamment en ce qui concerne les capacités liées au stockage et à la restitution de l'énergie élastique. De futures recherches gagneraient ainsi à combiner mesures biomécaniques et évaluations physiques afin d'établir une base plus robuste pour comprendre les liens entre organisation motrice et performance. Par ailleurs, bien que notre analyse ait porté sur la variabilité des paramètres cinématiques des genoux à une échelle locale et sur celle du CoM à une échelle globale, l'exploration de la variabilité intra- et inter-individuelle d'autres articulations telles que les hanches et les chevilles reste à approfondir. Par ailleurs, il serait aussi particulièrement intéressant d'examiner comment cette variabilité évolue en fonction du niveau d'expertise. Une comparaison entre joueurs de niveaux différents pourrait permettre d'identifier d'éventuelles signatures motrices associées à l'expertise et d'affiner l'interprétation fonctionnelle de la variabilité. L'utilisation de méthodes de classification pourrait également s'avérer pertinente pour identifier d'éventuels clusters de stratégies motrices au sein des joueurs. Enfin, cette étude s'est focalisée exclusivement sur des joueurs servant avec la technique du relais d'appuis. Or, certains joueurs, notamment au plus haut niveau, utilisent une technique alternative reposant sur des appuis écartés. Il serait donc pertinent, dans de futures études, d'examiner aussi la variabilité inter-individuelle associée à cette technique, afin de déterminer si un type d'appuis est plus adapté à un mode de contraction préférentielle ou des qualités physiques particulières.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

5.1.5 Conclusion

Notre étude a mis en évidence une variabilité inter-individuelle plus marquée au cours de la phase de préparation/flexion du service tant pour les paramètres cinématiques du CoM que pour ceux des genoux, comparativement à la phase d'accélération/extension. Ces résultats suggèrent l'existence de stratégies motrices individuelles propres à chaque joueur au début du mouvement. Nos résultats soutiennent l'idée selon laquelle les contraintes de la tâche de service tendent à limiter l'expression de ces stratégies individuelles au niveau de la cinématique du CoM et des genoux au cours de la phase d'accélération/extension. Ces observations soulignent la nécessité d'analyses de clustering pour mieux comprendre les stratégies motrices utilisées lors du service au tennis et leur influence sur la performance. D'un point de vue pratique, ces résultats invitent les entraîneurs à adopter une approche individualisée, en prenant en compte à la fois les exigences propres à la tâche et les caractéristiques spécifiques de chaque joueur.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

5.2 Étude 2 : Identification de stratégies motrices du service à partir des trajectoires du centre de masse à l'aide d'un clustering de données fonctionnelles multivariées

5.2.1 Introduction

Dans la littérature, la biomécanique du service est souvent abordée à travers une approche normative, reposant sur l'idée d'un « modèle technique idéal et unique » que les joueurs devraient reproduire (E. Anderson et al., 2021). Certains critères biomécaniques sont présentés comme des références universelles pour optimiser la performance (Roetert et al., 2009). Toutefois, cette vision tend à négliger la variabilité inter-individuelle et la diversité des stratégies motrices utilisées, qui pourraient être influencées par les caractéristiques propres à chaque joueur (Davids et al., 2003 ; Glazier & Mehdizadeh, 2019).

Dans cette perspective, l'étude précédente a mis en évidence une variabilité inter-individuelle notable de la cinématique du CoM et des genoux chez des joueurs professionnels, en particulier lors de la phase de préparation (Deghaies et al., 2024, 2025). Pourtant, malgré ces différences d'organisation biomécanique, les niveaux de performance observés en termes de vitesse maximale de la tête de raquette et de hauteur d'impact, étaient proches d'un joueur à l'autre. Ces résultats suggèrent l'existence d'un phénomène d'équifinalité, selon lequel différentes organisations motrices peuvent conduire à un niveau de performance comparable. Ils soulèvent également une question centrale : cette variabilité inter-individuelle correspond-elle à une dispersion continue de comportements individuels, ou peut-elle être structurée en un nombre limité de stratégies motrices distinctes ? Il apparait désormais nécessaire d'approfondir ce travail en cherchant à identifier des profils de joueurs présentant des stratégies biomécaniques similaires. Une telle démarche permettrait de combler le manque évident de recherches sur la diversité des techniques au service chez les joueurs de haut niveau (Lambrich & Muehlbauer, 2023). D'un point de vue pratique, classer les joueurs en fonction de leur stratégie motrice offrirait aux entraîneurs la possibilité d'adapter leurs consignes et de concevoir une approche plus individualisée de l'entraînement (Cassirame et al., 2024).

Des méthodes statistiques telles que le clustering peuvent être exploitées à cette fin. Alors qu'elles n'ont encore jamais été spécifiquement utilisées pour caractériser les straté-

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

gies motrices au service à partir de données biomécaniques, elles ont déjà été appliquées pour d'autres disciplines sportives telles que la course à pied, la natation et le basket ball (Floría et al., 2024 ; Jauhiainen et al., 2020 ; Martens et al., 2016 ; Morais et al., 2022 ; Rauch et al., 2020). Ces études font généralement appel à des méthodes de clustering reposant sur des variables discrètes, issues de données mesurées à des instants précis, correspondant le plus souvent à des valeurs cinématiques minimales ou maximales. Si ces indicateurs peuvent apporter des informations pertinentes, ils ne reflètent pas la nature continue des données biomécaniques et négligent notamment leur dimension temporelle. Cette approche peut donc délaisser des aspects essentiels quant à la manière dont les joueurs bougent au cours du service (Ramsay & Silverman, 2005). Dans la mesure où la préservation des caractéristiques temporelles est importante en biomécanique, il existe un intérêt croissant pour l'application des méthodes de clustering à des données fonctionnelles multivariées, dans un objectif de profilage des mouvements sportifs (Guess et al., 2020 ; Komitova et al., 2022 ; Phinyomark et al., 2015 ; Warren Liao, 2005). Ce type d'approche semble particulièrement adapté à l'analyse du service, dont la cinématique présente une forte dimension temporelle et une coordination segmentaire complexe (Martin, Kulpa, Delamarche & Bideau, 2013).

Ainsi, l'objectif principal de cette étude est d'appliquer une méthode de clustering à des données fonctionnelles multivariées portant sur la cinématique du CoM lors des phases de préparation et d'accélération, afin de déterminer si différentes stratégies motrices peuvent être distinguées chez des joueurs de tennis professionnels. Un second objectif consiste à caractériser les stratégies motrices mises en évidence en comparant les clusters obtenus sur le plan biomécanique. Nous émettons les hypothèses suivantes :

1. Plusieurs stratégies motrices distinctes sont utilisées au service par les joueurs professionnels.
2. Ces stratégies motrices diffèrent significativement au niveau des paramètres spatio-temporels du CoM et des genoux, mais pas en termes d'indicateurs de performance au service, ni de caractéristiques anthropométriques.

5.2.2 Méthodologie spécifique à l'étude

5.2.2.1 Participants

Au total, 34 joueurs de tennis professionnels (31 droitiers et 3 gauchers ; âge : 21,8 ± 3,5 ans ; taille : 1,88 ± 0,07 m ; masse : 79,9 ± 7,5 kg, tous classés à l'ATP entre le 17^{e} et le

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

1600^{e} rang mondial) ont volontairement participé à cette étude. Tous les participants ont servi avec leur technique habituelle, caractérisée par un relais d'appuis, au cours duquel le pied arrière rejoint le pied avant, avant l'action de poussée contre le sol. Aucun joueur ne présentait de blessure ou de douleur susceptible d'affecter la performance de son service au moment de l'expérimentation.

5.2.2.2 Capture de mouvement en 3D et protocole expérimental

La méthodologie et le protocole de capture du service en 3D utilisés pour cette étude sont décrits dans le chapitre 4.

5.2.2.3 Phases du service étudiées pour le clustering

Cette étude porte sur les phases de préparation et d'accélération du service, telles que définies dans l'étude précédente. Elles ont été délimitées à partir du mouvement vertical du CoM correspondant respectivement à sa descente puis à sa remontée.

5.2.2.4 Analyse fonctionnelle et méthode de clustering

Les trajectoires verticales et antéro-postérieures du CoM au cours des phases de préparation et d'accélération, calculées à partir des 5 services réussis réalisés par chaque joueur, ont été utilisées comme données d'entrée pour l'analyse de clustering. Une normalisation temporelle des données a été effectuée, conformément aux protocoles utilisés dans des études biomécaniques antérieures (Godwin et al., 2010 ; Ryan et al., 2006 ; Zin et al., 2020). Toutes les données ont été ramenées à 300 points, correspondant à une fréquence d'échantillonnage de 300 Hz et à une durée moyenne de service d'environ une seconde.

Les trajectoires discrètes du CoM (verticales et antéro-postérieures) ont ensuite été converties en données fonctionnelles à l'aide de fonctions de base de type B-splines, choisies pour leur stabilité numérique et leur flexibilité (Ramsay, 2002). Les vitesses verticales et antéro-postérieures du CoM ont été obtenues par dérivation directe de ces fonctions. Le lissage et la transformation des courbes ont été réalisés avec le package FDA sous R (version 4.4.1). Le paramètre de lissage (γ) a été ajusté automatiquement par validation croisée afin d'obtenir un bon équilibre entre la fidélité aux données originales et la régularité des courbes (Craven & Wahba, 1979).

L'algorithme funHDDC (Schmutz et al., 2020) a été utilisé pour réaliser le clustering. Cet algorithme, adapté aux données fonctionnelles multivariées, tient compte du fait que

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

les observations peuvent appartenir à des sous-espaces de dimensions différentes. Il combine une analyse en composantes principales fonctionnelles multivariées avec un modèle de mélange gaussien. L'algorithme repose sur la procédure Expectation-Maximization (EM), initialisée par un k-means, et a été appliqué pour un nombre de clusters potentiels compris entre 2 et 4. L'analyse a été réalisée à l'aide du package funHDDC sous R (Bouveyron & Jacques, 2017). Le critère d'information bayésien (BIC) a servi à la sélection du modèle. Le Slope Heuristic (SH) a permis de déterminer le nombre optimal de clusters.

5.2.2.5 Variables d'intérêt pour la comparaison des clusters

Les caractéristiques suivantes ont été collectées auprès des joueurs pour comparer les clusters : taille, masse, âge et classement ATP. Les indicateurs de performance considérés dans cette étude incluaient la vitesse de la balle, la vitesse maximale de la tête de raquette, la hauteur d'impact relative entre la balle et la raquette (exprimée en pourcentage de la taille du joueur - Impact Z), la position antéro-postérieure relative d'impact entre la balle et la raquette (exprimée en pourcentage de la taille du joueur - Impact Y) (Figure 5.5) et le pourcentage de réussite, correspondant au nombre d'essais nécessaires à chaque joueur pour réussir 5 premières balles « à plat » dans la zone du « T ».

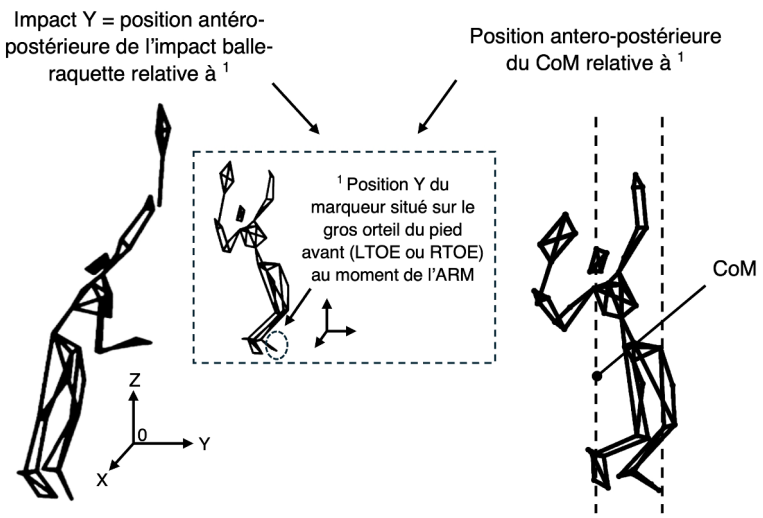


FIGURE 5.5 – Méthode de calcul de la position antéro-postérieure de l'impact et du CoM. CoM : centre de masse, Impact Y : position antéro-postérieure du point d'impact balle-raquette, LTOE : tête du gros orteil gauche, RTOE : tête du gros orteil droit.

En plus des indicateurs de performance, plusieurs variables cinématiques et temporelles ont été calculées pour comparer les différents clusters :

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

— les positions verticale et antéro-postérieure du CoM au début de la phase de préparation, à la fin de la phase de préparation et à la fin de la phase d'accélération, exprimées en pourcentage de la taille de chaque joueur (Figure 5.5)

— les amplitudes de déplacement vertical et antéro-postérieur du CoM durant les phases de préparation et d'accélération, également exprimées en pourcentage de la taille de chaque joueur

— les vitesses maximales verticales et antéro-postérieures durant les phases de préparation et d'accélération

— les angles internes des genoux avant et arrière mesurés à différents moments clés du service : flexion maximale, lancer de balle (LB), position armée (ARM) et impact (IMP) (θ Genou^{min}, θ Genou^{LB}, θ Genou^{ARM}, θ Genou^{IMP}, respectivement)

— les amplitudes angulaires de la flexion et de l'extension des genoux avant et arrière

— les vitesses angulaires maximales des genoux avant et arrière lors des phases de flexion et d'extension

— la durée des phases de préparation et d'accélération,

— la durée du vol de la balle pendant le lancer, correspondant à l'intervalle temporelle entre LB et IMP

— le timing d'apparition du LB par rapport au début de la phase de préparation

5.2.2.6 Analyses statistiques

Les données sont présentées sous forme de moyenne ± écart-type. Les comparaisons entre clusters concernant les caractéristiques anthropométriques, les indicateurs de performance, les paramètres cinématiques et temporels du service ont été réalisées à l'aide de tests t de Student lorsque l'hypothèse de normalité était respectée. Lorsque cette hypothèse n'était pas vérifiée, un test non paramétrique de Mann-Whitney a été appliqué. Les valeurs de p ont été ajustées à l'aide de la méthode de Benjamini-Hochberg pour contrôler le taux de fausses découvertes. Toutes les analyses ont été réalisées avec le logiciel Jamovi (The Jamovi Project, version 2.3.28.0). Le seuil de significativité a été fixé à $p = 0,05$.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

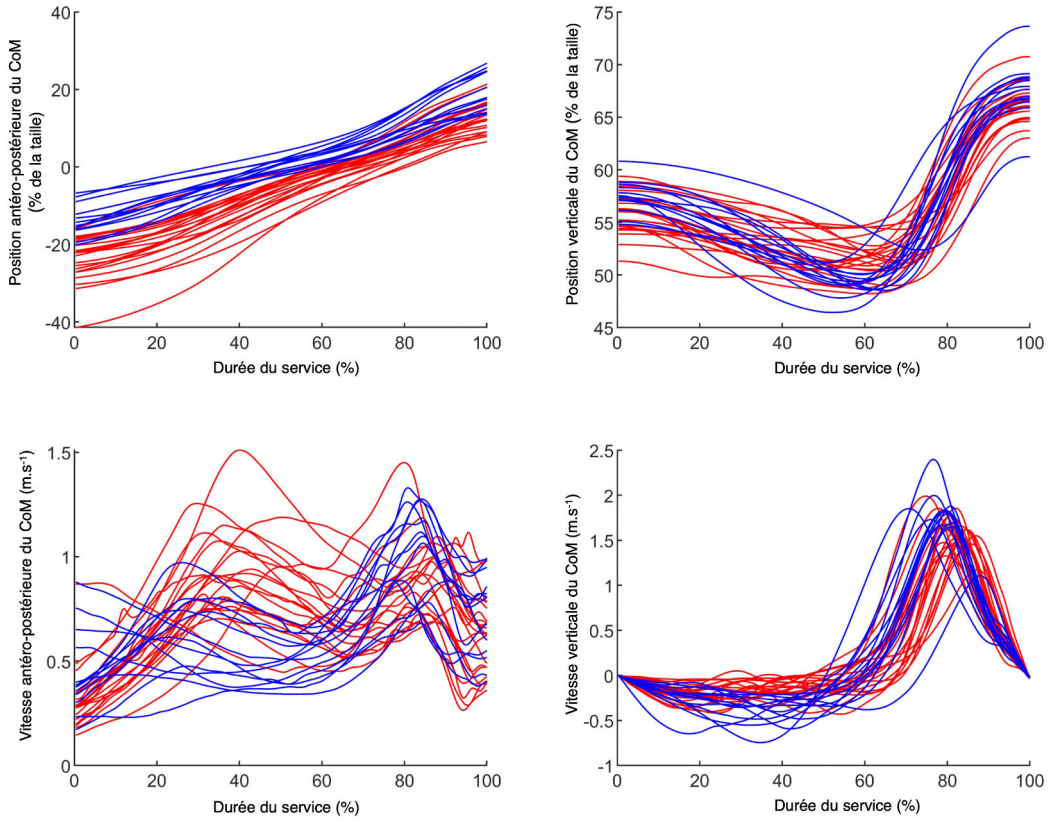


FIGURE 5.6 – Trajectoires et vitesses verticales et antéro-postérieures du CoM au cours du service pour les joueurs du cluster 1 (bleu) et du cluster 2 (rouge). CoM : centre de masse.

5.2.3 Résultats

5.2.3.1 Résultat du clustering

L'analyse de clustering a permis d'identifier deux groupes distincts en se basant sur le BIC et le SH : le cluster 1 ($n = 13$ joueurs) et le cluster 2 ($n = 21$ joueurs). La Figure 5.6 présente les courbes individuelles des variables cinématiques utilisées comme données d'entrée pour le clustering, chaque cluster étant distingué par une couleur différente.

5.2.3.2 Caractéristiques anthropométriques et indicateurs de performance entre les clusters

Les joueurs du cluster 2 sont significativement plus lourds (82,3 ± 6,4 kg contre 76,1 ± 7,8 kg ; $p = 0,047$), servent plus fort (191,0 ± 7,7 km · h^{-1} contre 180,4 ± 9,8 km · h^{-1} ; $p = 0,006$) et atteignent une vitesse maximale de tête de raquette plus élevée (48,7 ± 1,9

$m \cdot s^{-1}$ contre 46,0 ± 2,7 $m \cdot s^{-1}$; $p = 0,011$) que les joueurs du cluster 1 (Tableau 5.7). En revanche, le cluster 1 présente une hauteur d'impact significativement plus importante (149,0 ± 3,3 % contre 146,8 ± 2,2 % de la taille ; $p = 0,049$), tend à avoir une position antéro-postérieure de l'impact plus avancée (34,4 ± 8,2 % de la taille contre 30,7 ± 4,7 % de la taille ; $p = 0,064$), et montre un pourcentage de réussite significativement supérieur à celui du cluster 2 (54,5 ± 16,0 % contre 44,9 ± 11,6 % ; $p = 0,041$).

	Cluster 1 (n = 13)	**Cluster 2 (n = 21)**	***p***	***p* ajusté (B-H)**
Taille (m)	1,85 ± 0,09	1,90 ± 0,06	0,095	0,155
Masse corporelle (kg)	76,1 ± 7,8	82,3 ± 6,4	0,018	0,047
Age (ans)	21,1 ± 3,3	22,2 ± 3,7	0,416	0,523
Classement ATP	437 ± 481	342 ± 278	0,869	0,988
Vitesse de balle ($km \cdot h^{-1}$)	180,4 ± 9,8	191,0 ± 7,7	0,001	0,006
Vitesse maximale de la tête de raquette ($m \cdot s^{-1}$)	46,0 ± 2,7	48,7 ± 1,9	0,002	0,011
Impact Z (% de la taille)	149,0 ± 3,3	146,8 ± 2,2	0,021	0,049
Impact Y (% de la taille)	34,4 ± 8,2	30,7 ± 4,7	0,029	0,064

TABLE 5.7 – Comparaison des paramètres anthropométriques et des indicateurs de performance entre les clusters 1 et 2. Impact Z : hauteur d'impact relative balle-raquette ; Impact Y : position antéro-postérieure relative d'impact balle-raquette ; p : valeur de p brute ; p ajusté (B-H) : valeur de p corrigée selon la méthode de Benjamini–Hochberg.

5.2.3.3 Paramètres cinématiques du CoM

Au début de la phase de préparation, le CoM du cluster 1 est positionné significativement plus haut (57,4 ± 1,6 % de la taille contre 55,8 ± 2,0 % de la taille ; p = 0,047) et plus en avant ($-14,0 \pm 4,0$ % de la taille contre $-23,9 \pm 5,9$ % de la taille ; $p < 0,001$) par rapport au cluster 2 (Tableau 5.8).

En fin de phase de préparation, le CoM du cluster 1 atteint une position plus basse (49,3 ± 1,5 % de la taille contre 51,2 ± 1,8 % de la taille ; $p = 0,015$) et plus avancée (2,6 ± 2,0 % de la taille contre $-3,2 \pm 5,9$ % de la taille ; $p < 0,001$) que le cluster 2. Par conséquent, l'amplitude de descente du CoM est significativement plus importante pour le cluster 1 ($-8,1 \pm 1,6$ % de la taille contre 4,5 ± 1,6 % de la taille ; $p < 0,001$). En revanche, le cluster 1 présente une amplitude d'avancée du CoM durant cette même phase inférieure à celle du cluster 2 (16,6 ± 3,3 % de la taille contre 20,7 ± 4,7 % de la taille ; $p = 0,041$).

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

À la fin de la phase d'accélération, le cluster 2 atteint une position du CoM plus avancée (19,5 ± 5,2 % de la taille contre 13,0 ± 3,9 % de la taille ; $p < 0{,}001$). A l'inverse, l'amplitude de remontée du CoM durant cette phase est plus importante chez le cluster 1 (18,3 ± 4,0 % de la taille contre 15,1 ± 2,7 % de la taille ; $p = 0{,}033$).

Le cluster 1 montre des vitesses maximales de descente et de remontée du CoM plus élevées ($-0,5 \pm 0{,}1$ m · s^{-1} contre $-0,3 \pm 0{,}1$ m · s^{-1} ; $p < 0{,}001$, et $1{,}8 \pm 0{,}3$ m · s^{-1} contre $1{,}6 \pm 0{,}2$ m · s^{-1} ; $p = 0{,}022$, respectivement). Au contraire, le cluster 2 présente une vitesse maximale vers l'avant significativement plus importante (1,0 ± 0,2 m · s^{-1} contre 0,7 ± 0,1 m · s^{-1} ; $p < 0{,}001$).

5.2.3.4 Paramètres cinématiques des genoux

Pour le genou avant, le cluster 1 montre une flexion maximale plus importante (103,7 ± 7,6° *vs.* 111,1 ± 7,3° ; $p = 0{,}032$) et tend à fléchir davantage ce genou lors de l'ARM (111,7 ± 8,9° *vs.* 118,1 ± 8,7° ; $p = 0{,}090$) que le cluster 2 (Tableau 5.9). De plus, le cluster 1 montre une amplitude d'extension du genou avant supérieure (69,0 ± 10,2° *vs.* 60,1 ± 10,0° ; $p = 0{,}047$) et une tendance à une vitesse maximale d'extension plus élevée (628,0 ± 144,9° · s^{-1} *vs.* 524,6 ± 121,2° · s^{-1} ; $p = 0{,}064$).

Pour le genou arrière, les joueurs du cluster 2 présentaient une tendance à une flexion plus marquée au moment du LB (144,7 ± 13,9° *vs.* 156,2 ± 15,7° ; $p = 0{,}064$), mais tendaient à atteindre une flexion maximale moins prononcée que ceux du cluster 1 (93,2 ± 6,4° *vs.* 88,4 ± 7,3° ; $p = 0{,}092$). En conséquence, l'amplitude de flexion du genou arrière était significativement moins importante dans le cluster 2 que dans le cluster 1 (59,0 ± 12,0° *vs.* 70,0 ± 14,0° ; $p = 0{,}049$).

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

	Vertical (Z)				**Antéro-postérieur (Y)**			
	Cluster 1 ($n = 13$)	**Cluster 2 ($n = 21$)**	p	p **ajusté (B-H)**	**Cluster 1 ($n = 13$)**	**Cluster 2 ($n = 21$)**	p	p **ajusté (B-H)**
Position du CoM au début de la phase de préparation (% de la taille)	57,4 ± 1,6	55,8 ± 2,0	0,017	0,047	$-14,0 \pm 4,0$	$-23,9 \pm 5,9$	<0,001	<0,001
Position du CoM à la fin de la phase préparation (% de la taille)	49,3 ± 1,5	51,2 ± 1,8	0,003	0,015	2,6 ± 2,0	$-3,2 \pm 5,9$	<0,001	<0,001
Position du CoM à la fin de la phase d'accélération (% de la taille)	67,6 ± 2,7	66,4 ± 1,7	0,055	0,093	19,5 ± 5,2	13,0 ± 3,9	<0,001	<0,001
Amplitude de déplacement du CoM durant la phase de préparation (% de la taille)	$-8,1 \pm 1,6$	$-4,5 \pm 1,6$	<0,001	<0,001	16,6 ± 3,3	20,7 ± 4,7	0,013	0,041
Amplitude de déplacement du CoM durant la phase d'accélération (% de la taille)	18,3 ± 4,0	15,1 ± 2,7	0,009	0,033	17,0 ± 4,4	16,2 ± 5,2	0,381	0,508
Vitesse maximale du CoM durant la phase de préparation ($m \cdot s^{-1}$)	$-0,5 \pm 0,1$	$-0,3 \pm 0,1$	<0,001	<0,001	0,7 ± 0,1	1,0 ± 0,2	<0,001	<0,001
Vitesse maximale du CoM durant la phase d'accélération ($m \cdot s^{-1}$)	1,8 ± 0,3	1,6 ± 0,2	0,005	0,022	1,1 ± 0,2	0,9 ± 0,2	0,300	0,413

TABLE 5.8 – Comparaison des paramètres cinématiques discrètes du CoM (vertical et antéro-postérieur) entre Cluster 1 et Cluster 2. CoM : centre de masse ; p : valeur de p brute ; p ajusté (B-H) : valeur de p corrigée selon la méthode de Benjamini–Hochberg.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

	Genou avant				Genou arrière			
	Cluster 1 ($n = 13$)	**Cluster 2 ($n = 21$)**	***p***	***p* ajusté (B-H)**	**Cluster 1 ($n = 13$)**	**Cluster 2 ($n = 21$)**	***p***	***p* ajusté (B-H)**
θ^{min} Genou (°)	103,7 ± 7,6	111,1 ± 7,3	0,008	0,032	88,4 ± 7,3	93,2 ± 6,4	0,052	0,092
θ Genou au moment du LB (°)	152,6 ± 12,3	152,8 ± 18,5	0,977	0,988	156,2 ± 15,7	144,7 ± 13,9	0,032	0,064
θ Genou au moment de l'ARM (°)	111,7 ± 8,9	118,1 ± 8,7	0,049	0,090	97,3 ± 7,5	101,9 ± 10,0	0,161	0,244
θ Genou au moment de l'IMP (°)	154,0 ± 8,6	153,6 ± 10,4	0,925	0,988	171,5 ± 9,4	172,8 ± 5,7	0,551	0,673
Amplitude de flexion du genou (°)	65,9 ± 15,4	63,1 ± 9,7	0,193	0,274	70,0 ± 14,0	59,0 ± 12,0	0,020	0,049
Amplitude d'extension du genou (°)	69,0 ± 10,2	60,1 ± 10,0	0,017	0,047	86,5 ± 8,0	82,7 ± 6,2	0,133	0,209
Vitesse maximale de flexion du genou ($° \cdot s^{-1}$)	166,1 ± 159,0	171,0 ± 35,1	0,400	0,518	320,0 ± 82,5	352,3 ± 53,3	0,173	0,254
Vitesse maximale d'extension du genou ($° \cdot s^{-1}$)	628,0 ± 144,9	524,6 ± 121,2	0,032	0,064	671,7 ± 74,5	592,7 ± 72,6	0,988	0,988

TABLE 5.9 – Comparaison des paramètres cinématiques discrètes des genoux avant et arrière entre Cluster 1 et Cluster 2. θ : angle, ^{min} : minimal ; LB : lancer de balle ; ARM : position armée ; IMP : impact balle-raquette ; p : valeur de p brute ; p ajusté (B-H) : valeur de p corrigée selon la méthode de Benjamini–Hochberg.

5.2.3.5 Paramètres temporels

Aucune différence significative n'a été observée pour les paramètres temporels. En revanche, le moment du LB tend à survenir plus tôt chez le cluster 1. Il arrive avant le début de la phase de préparation dans le cluster 1, alors qu'il apparaît après celle-ci dans le cluster 2 ($-0,08 \pm 0,08$ *vs.* $0,10 \pm 0,13$; $p = 0,069$) (Tableau 5.10).

	Cluster 1 (n = 13)	**Cluster 2 (n = 21)**	**p**	**p ajusté (B-H)**
Durée de la phase de préparation (s)	0,58 ± 0,09	0,57 ± 0,12	0,880	0,988
Durée de la phase d'accélération (s)	0,40 ± 0,06	0,40 ± 0,08	0,846	0,988
Durée du service (s)	0,97 ± 0,09	0,97 ± 0,10	0,977	0,988
Classement ATP	437 ± 481	342 ± 278	0,869	0,988
Durée de vol de la balle entre LB et IMP (s)	0,99 ± 0,09	0,98 ± 0,17	0,925	0,988
Timing d'apparition du LB par rapport au début de la phase de préparation (s)	$-0,08 \pm 0,08$	0,1 ± 0,13	0,036	0,069

TABLE 5.10 – Comparaison des paramètres temporels entre les clusters 1 et 2. IMP : moment d'impact balle-raquette ; LB : lancer de balle ; p : valeur de p brute ; p ajusté (B-H) : valeur de p corrigée selon la méthode de Benjamini–Hochberg.

5.2.4 Discussion

L'objectif principal de cette étude était d'identifier et de caractériser les différentes stratégies motrices utilisées par les joueurs de tennis professionnels lors des phases de préparation et d'accélération du service, puis de les comparer pour mettre en évidence les spécificités cinématiques propres à chacune.

La méthode de clustering fonctionnel utilisé a permis de mettre en évidence deux stratégies motrices distinctes au niveau de la cinématique du CoM. Ce résultat confirme notre première hypothèse, selon laquelle la variabilité inter-individuelle identifiée dans l'étude précédente traduit l'existence de stratégies motrices différenciées au service. Il s'inscrit dans la continuité des travaux ayant montré l'existence de plusieurs solutions motrices permettant d'atteindre une performance efficace chez des sportifs entraînés dans d'autres disciplines (course à pied, natation, basket-ball) (Lussiana et al., 2017 ; Rauch et al., 2020 ; Rivadulla et al., 2024 ; Seifert et al., 2011).

En revanche, contrairement à ce que nous avancions dans l'étude précédente en nous basant sur l'analyse de cas de 2 joueurs professionnels, nos résultats ne confirment pas l'hypothèse selon laquelle ces différentes stratégies motrices conduiraient à des indicateurs

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

de performance équivalents, en termes de vitesse de balle et de position d'impact. De plus, et contrairement à notre hypothèse initiale, les deux clusters identifiés se différencient également au niveau des paramètres anthropométriques, ce qui suggère que les stratégies motrices mises en évidence pourraient être, au moins en partie, liées aux contraintes propres à l'organisme des joueurs.

En effet, le cluster 1 regroupe des joueurs caractérisés par un impact balle-raquette plus haut (+0,022 × la taille) et une tendance à un impact plus avancé (+0,037 × la taille). Ce cluster obtient également un pourcentage de réussite supérieur (+9,6 %). A l'inverse, le cluster 2 rassemble des joueurs plus lourds (+6 kg) et qui génèrent des vitesses de balle (+11 km · h^{-1}) et de tête de raquette (+3 m · s^{-1}) plus élevées.

Ces résultats suggèrent que les deux clusters correspondent à des stratégies motrices distinctes, orientées vers des dimensions différentes de la performance au service (soit la position d'impact donc le pourcentage de réussite, soit la vitesse), illustrant ainsi le caractère multifactoriel et non linéaire de celle-ci (Colomar, Corbi, Brich & Baiget, 2022). Le cluster 1 semble privilégier une stratégie fondée sur un point d'impact haut et avancé, favorisant un niveau de sécurité par rapport au filet et un engagement vers l'avant pour améliorer le pourcentage de réussite, tandis que le cluster 2 semble davantage orienté vers l'optimisation de la vitesse de la tête de raquette et donc de la vitesse de balle.

Les différences observées entre les clusters peuvent être interprétées à la lumière de la théorie dynamique du contrôle moteur (Davids et al., 2003 ; Newell, 1986 ; Seifert et al., 2013), selon laquelle la coordination motrice résulte d'un processus d'auto-organisation (« self organization ») sous l'influence de différentes contraintes : liées à la tâche, à l'environnement, et à l'organisme. Dans notre étude, les contraintes de la tâche et de l'environnement étaient identiques pour tous les joueurs, les différences observées semblent donc découler principalement des contraintes organismiques (paramètres anthropométriques, composition corporelle, architecture musculaire, caractéristiques physiques spécifiques, préférences motrices et modes de contraction préférentiels). Dans ce travail, seuls les paramètres anthropométriques ont été mesurés, et ils pourraient, à ce stade, constituer un premier facteur explicatif des différences observées en termes de stratégie motrice et de performance entre les clusters 1 et 2.

Il est possible que les joueurs du cluster 1, plus légers que ceux du cluster 2 et également légèrement plus petits (bien que cette dernière différence ne soit pas statistiquement significative), cherchent à compenser leurs caractéristiques morphologiques en propulsant davantage leur CoM vers l'avant et vers le haut, afin de favoriser un impact de balle plus

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

avancé et plus élevé. De cette façon, ils peuvent obtenir une marge de sécurité plus importante par rapport au filet, s'ouvrir davantage les angles et augmenter leur pourcentage de réussite par rapport aux joueurs du cluster 2. En effet, sur le plan stratégique, il paraît logique que ce type de joueurs privilégie le pourcentage de réussite plutôt que la vitesse de balle afin de gêner le retourneur. Ce choix tactique est fréquemment évoqué dans les discours des joueurs et des entraîneurs au plus haut niveau. A titre d'illustration, Juan Ignacio Chela, entraîneur de Diego Schwartzman, l'un des joueurs les plus petits du circuit dans les années 2010, expliquait qu'« il ne sera jamais un serveur puissant, il doit donc avoir un très fort pourcentage de premiers services ». De manière similaire, Novak Djokovic déclarait en interview qu'il n'avait jamais cherché à frapper son service le plus fort possible, préférant « servir à 190 $km \cdot h^{-1}$ et frapper la ligne pour trouver la zone optimale et obtenir un avantage immédiat dans l'échange » (Palmer, 2025). Rafael Nadal tenait un propos similaire en affirmant que le service devait avant tout permettre « de bien démarrer le point », précisant que « ce n'est pas une question de vitesse, mais plutôt de capacité à mettre l'adversaire en difficulté [...] le service doit avant tout être dans le carré, il doit être régulier » (Served with Andy Roddick, 2025).

La stratégie motrice du cluster 1 semble être adaptée à cet objectif. Les joueurs présentent des amplitudes de descente et une remontée du CoM plus importantes, caractérisées par des vitesses maximales plus élevées vers le bas puis vers le haut, permettant d'atteindre une hauteur d'impact supérieure à celle du cluster 2. Leur position plus avancée du CoM au cours des phases de préparation et d'accélération contribue également à expliquer un point d'impact plus situé à l'intérieur du terrain. Ce cluster regroupe des joueurs que l'on pourrait qualifier de « verticaux », en raison de l'amplitude et de la vitesse verticales élevées de leur CoM. Comme mentionné dans l'étude précédente de cette thèse, les joueurs semblent adopter une stratégie motrice typique d'un mode de contraction fortement pliométrique au niveau des membres inférieurs, caractérisé par un comportement cinématique du CoM semblable à un « ressort » avec une trajectoire en forme de (« V ») (Figure 5.7). Sur le plan temporel, le déclenchement de la descente du CoM qui tend à être plus tardif (après le moment du LB) semble favoriser ce type de contraction. Cette stratégie s'appuie sur des angles de flexion des genoux plus marqués et une amplitude et une vitesse d'extension plus élevées du genou avant (Figure 5.8). Elle fait écho aux travaux antérieurs ayant souligné la contribution déterminante des membres inférieurs, et notamment de la flexion des genoux, dans la production de la vitesse verticale du CoM et de la hauteur d'impact au service (Girard et al., 2007 ; Hornestam et al., 2021 ; Reid

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

et al., 2008).

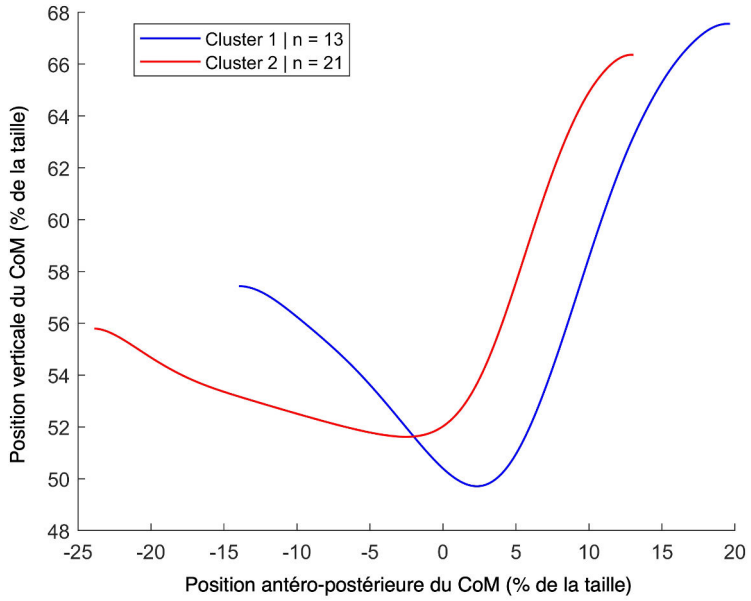


FIGURE 5.7 – Trajectoire verticale du CoM en fonction de la trajectoire horizontale (en abscisse) pour le cluster 1 (en bleu) et le cluster 2 (en rouge).

A l'inverse, les joueurs du cluster 2 sont avantagés sur le plan anthropométrique par rapport à ceux du cluster 1, étant en moyenne significativement plus lourds et légèrement plus grands (+ 5 cm en moyenne), même si cette différence n'est pas significative sur le plan statistique. La littérature rapporte que la masse et la taille des joueurs sont significativement et positivement corrélées à la vitesse du service (Baiget et al., 2022 ; Bonato et al., 2014 ; Fett et al., 2020 ; Vaverka & Cernosek, 2013 ; Wong et al., 2014), ce qui pourrait en partie expliquer leur vitesse de balle plus élevée. Sur le plan biomécanique, ces joueurs ont tendance à entamer la descente de leur CoM avant le moment du LB, adoptant ainsi une organisation favorisant un mode de contraction pliométrique différent où la phase excentrique est moins prononcée en termes d'amplitude au niveau des genoux. Le comportement cinématique du CoM présente une trajectoire en forme de (« S ») (Figure 5.7). Dès le début de la phase de la préparation, leur genou arrière tend à être plus fléchi (Figure 5.8) et ils adoptent une position du CoM plus basse et plus postérieure que le cluster 1. Ce cluster regroupe des joueurs que l'on pourrait qualifier de « horizontaux » car ils possèdent des amplitudes et des vitesses maximales de déplacement supérieures

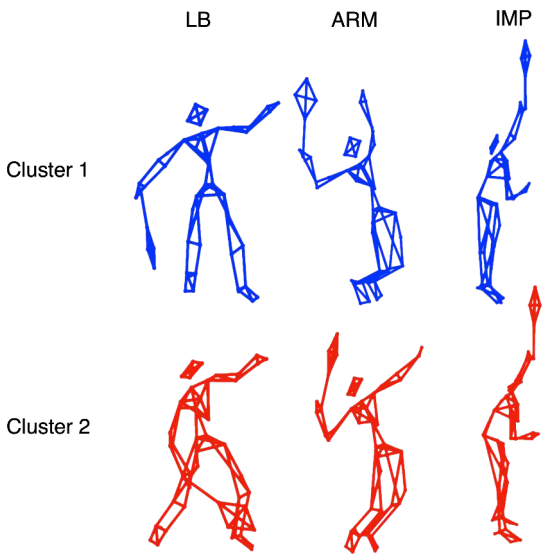


FIGURE 5.8 – Illustration comparative des stratégies motrices à différents instants clés du service (LB, ARM et IMP) entre deux joueurs représentatifs de chaque cluster. LB : lancer de balle ; ARM : position armée ; IMP : impact balle-raquette.

vers l'avant au cours de la phase de préparation et leur amplitude de flexion du genou arrière est plus limitée. De plus, leur amplitude et leur vitesse d'extension du genou avant sont inférieures au cluster 1. Au-delà de leurs caractéristiques anthropométriques supérieures, le gain de vitesse de balle des joueurs du cluster 2 peut aussi s'expliquer par leur stratégie motrice orientée vers la production d'une vitesse horizontale du CoM supérieure, maximisant la quantité de mouvement vers l'avant pour frapper plus fort (Elliott, Reid & Crespo, 2003). Cette stratégie apparaît également compatible avec leur profil morphologique de joueurs plus massifs. Enfin, il est possible que d'autres facteurs biomécaniques et physiques tels que la contribution des rotations du tronc et des segments du membre supérieur, les amplitudes articulaires, la force et la puissance musculaire (Bonato et al., 2014 ; Colomar, Corbi, Brich & Baiget, 2022 ; Fett et al., 2020 ; Palmer et al., 2018 ; Vacek et al., 2023) puissent expliquer les différences de vitesse de balle entre les clusters. Néanmoins, notre étude n'a pas pris en compte ces éléments.

Si l'on cherche à établir des analogies avec les résultats de clustering issus d'autres études, nos observations font écho à celles rapportées en golf. En effet, Shepherd et al. (2020) ont identifié trois profils de golfeurs (les « jumpers », les « sliders » et les « spinners ») à partir de l'analyse des forces de réaction au sol. Les « jumpers » favorisaient la production de force dans la direction verticale et présentaient donc un comportement

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

comparable aux « verticaux » de notre cluster 1. Les « sliders » privilégiaient la production de force orientée vers l'avant et peuvent être rapprochés des « horizontaux » de notre cluster 2. En revanche, les « spinners » caractérisés par une production de force davantage médio-latérale ne trouvent pas d'équivalent dans notre étude. Dans l'étude de Shepherd et al. (2020), le style de production de force n'était lié ni au niveau de pratique des golfeurs, ni à la vitesse de swing. En termes de perspectives, il serait intéressant d'intégrer des plateformes de force dans l'analyse du service pour déterminer si les stratégies « horizontale » et « verticale » mises en évidence au niveau de la cinématique du CoM se retrouvent aussi au niveau de l'orientation et de l'amplitude des forces de réaction produites au sol.

En termes d'implications pratiques, ces résultats soulignent l'intérêt de tenir compte des caractéristiques anthropométriques et des stratégies motrices propres à chaque joueur, plutôt que de chercher à imposer un modèle technique unique au service. Ils invitent les entraîneurs à individualiser leurs consignes et leurs contenus d'entraînement en fonction des objectifs de performance poursuivis (vitesse, régularité, sécurité) et du profil biomécanique du joueur.

Afin identifier la stratégie motrice privilégiée par un joueur, l'entraîneur peut se focaliser sur la phase de préparation du service. Il s'agit par exemple de déterminer si le joueur adopte une position initiale plutôt basse ou haute, avec un genou arrière fortement ou légèrement fléchi, et un CoM plutôt en position postérieure ou, au contraire, plus avancée.

Il apparaît également possible d'orienter un joueur vers la stratégie la mieux adaptée à ses caractéristiques anthropométriques. Pour une stratégie « verticale », l'accent pourrait être mis sur l'optimisation du mouvement de flexion-extension en vitesse et amplitude, notamment au niveau du genou avant, afin de favoriser une impulsion verticale permettant un impact balle raquette plus haut et plus avancé. À l'inverse, pour la stratégie « horizontale », le travail pourrait privilégier un début de préparation caractérisé par une position abaissée et reculée du CoM, suivi d'un transfert rapide de poids vers l'avant. L'objectif principal de cette stratégie serait alors de privilégier la production d'une quantité de mouvement vers l'avant visant à maximiser la vitesse de balle.

Parmi les limites de cette étude, les données d'entrée utilisées pour le clustering ne prenaient en compte que la cinématique verticale et antéro-postérieure du CoM sur une période limitée du service. L'intégration de paramètres biomécaniques supplémentaires au niveau des membres inférieurs et/ou supérieurs sur l'ensemble de la durée du service (depuis le déclenchement du mouvement jusqu'à la réception du joueur au sol) pourrait

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

permettre une compréhension plus fine du mouvement et révéler l'existence de clusters supplémentaires. A titre d'exemple, Rauch et al. (2020) ont mis en évidence, chez des basketteurs professionnels, trois stratégies distinctes utilisées lors de la phase descendante d'un saut vertical (stiff flexors, hyper-flexors et hip flexors), en intégrant des variables cinématiques en lien avec les mouvements des chevilles, des genoux et des hanches et des données de forces de réaction du sol. Une autre limite tient au fait que cette étude ne porte que sur des joueurs servant avec la technique du relais d'appuis. Il serait intéressant d'étudier les stratégies motrices chez des joueurs servant avec des appuis écartés à l'aide d'une méthode de clustering similaire. Par ailleurs, la taille relativement réduite de l'échantillon ($n = 34$) constitue une limite supplémentaire, notamment au regard des effectifs plus importants observés dans d'autres études de clustering (Floría et al., 2024 ; Forrester & Townend, 2015 ; Guess et al., 2020 ; Phinyomark et al., 2015 ; Rauch et al., 2020). Enfin, en termes de perspective, l'utilisation de plateformes de force dans de futures études permettrait de recueillir des données dynamiques en lien avec les forces de réaction au sol et d'approfondir la compréhension des différences entre les clusters, notamment en ce qui concerne la contribution spécifique de chaque jambe à la production de force et à l'orientation de celle-ci (« verticale » *vs.* « horizontale »).

5.2.5 Conclusion

Notre étude a mis en évidence l'existence de deux stratégies motrices différentes quant à la cinématique du CoM chez les joueurs de tennis professionnels utilisant la technique du relais d'appuis au service : une stratégie « verticale » et une stratégie « horizontale ». Chacune de ces stratégies se caractérise par des paramètres cinématiques spécifiques et conduit à des formes de performance différentes : la stratégie « verticale » favorise un impact plus haut et plus avancé et par conséquent un meilleur pourcentage de réussite, tandis que la stratégie « horizontale » est associée à une plus grande vitesse de balle. Ces écarts pourraient trouver leur origine dans les préoccupations stratégiques des joueurs (privilégier la vitesse du service ou sa réussite) et/ou leurs caractéristiques anthropométriques, lesquelles peuvent être envisagées comme des contraintes qui agissent sur le mouvement au sens de la théorie dynamique du contrôle moteur. Pour les entraîneurs, la compréhension des stratégies motrices qui en découlent représente un levier essentiel pour affiner l'individualisation de l'entraînement.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Chapitre 6

Variabilité inter-individuelle et stratégies motrices liées à la cinématique du tronc autour de l'axe longitudinal

6.1 Étude 3 : Variabilité inter-individuelle de la rotation longitudinale du tronc au service et performance chez des joueurs de tennis experts

6.1.1 Introduction

Des vitesses de balle maximales dépassant 200 km $\cdot$ h^{-1} au service sont fréquemment observées dans le tennis professionnel masculin et sont devenues indispensables pour s'imposer à haut niveau (Mecheri et al., 2016). L'atteinte de telles vitesses repose sur un transfert optimal de l'énergie depuis les membres inférieurs jusqu'au membre supérieur dominant, rendu possible par les rotations du tronc, qui jouent un rôle clé dans la chaîne cinématique proximo-distale (Bahamonde, 2000 ; De Subijana & Navarro, 2010 ; Kibler & Van der Meer, 2001 ; Kovacs & Ellenbecker, 2011b ; Martin, Bideau, Bideau et al., 2014 ; Martin, Kulpa, Delamarche & Bideau, 2013 ; Reid et al., 2008 ; Sweeney et al., 2012). Une mauvaise synchronisation dans la séquence de ces rotations peut non seulement réduire la performance mais aussi augmenter le risque de blessure (Martin, Kulpa, Ropars et al., 2013 ; Reid et al., 2008).

La contribution des rotations du tronc à la performance du service varie selon l'axe de rotation considéré : antéro-postérieur, transversal ou longitudinal (Bahamonde, 2000). Même si les rotations longitudinales du pelvis (600° $\cdot$ s^{-1}) et du thorax (900° $\cdot$ s^{-1}) sont

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

les rotations les plus rapides mesurées au niveau du tronc (Fleisig et al., 2003 ; Van Trigt et al., 2025), certaines études suggèrent que ces rotations contribuent moins à la vitesse de balle que les rotations antéro-postérieure et transverse (Bahamonde, 2000 ; Martin, Kulpa, Delamarche & Bideau, 2013). Bahamonde (2000) a montré que le moment cinétique autour de l'axe longitudinal au cours du service était non seulement le plus faible, mais aussi le plus variable entre les joueurs. Cette variabilité inter-individuelle pourrait s'expliquer par le faible moment d'inertie du tronc autour de cet axe, qui offrirait une plus grande liberté de rotation pour ce segment. Whiteside et al. (2013b) n'ont montré aucune différence significative de vitesse maximale de rotation longitudinale du tronc entre trois groupes de joueuses expertes (prépubères, pubères et adultes) malgré des différences significatives de vitesse de raquette mesurée au moment de l'impact. À l'inverse, d'autres études ont suggéré que la rotation longitudinale du tronc joue un rôle important dans la performance. Par exemple, Gordon et Dapena (2006) ont estimé qu'elle contribue à environ 40 % de la vitesse de la raquette juste avant l'impact. De leur côté, Van Trigt et al. (2025) ont établi une relation de régression positive et significative entre la vitesse de balle et la vitesse maximale de rotation longitudinale du tronc chez les joueurs professionnels. Leur modèle montre qu'une augmentation d'environ $181° \cdot s^{-1}$ de la vitesse longitudinale du tronc lors du premier service est associée à une hausse de vitesse de balle de $10 \text{ km} \cdot h^{-1}$.

Au-delà des valeurs maximales de vitesses de rotations longitudinales du pelvis et du thorax, il est important de considérer leur timing d'apparition au sein de la chaîne proximo-distale. En effet, l'enchainement progressif des rotations articulaires et segmentaires permet de transférer l'énergie tout au long de cette chaine, selon le principe de sommation des vitesses (Knudson, 2007 ; Martin, Bideau, Bideau et al., 2014). Là encore, les résultats obtenus dans la littérature sont controversés. D'un côté, Martin, Kulpa, Ropars et al. (2013) et Wagner et al. (2014) ont rapporté que le pelvis atteint sa vitesse maximale avant le thorax, soutenant l'utilisation d'une séquence proximo-distale par les joueurs. De l'autre côté, Van Trigt et al. (2025) et Fleisig et al. (2003) ont observé un enchaînement temporel inverse avec une vitesse maximale de rotation longitudinale du thorax atteinte 10 à 28 millisecondes avant celle du pelvis. L'impact du décalage temporel de ces deux variables sur la performance, notamment la vitesse de balle, n'a à ce jour pas été étudié. En outre, aucun consensus n'existe sur l'avantage d'un enchaînement plutôt qu'un autre.

Défini comme l'angle formé dans le plan transverse entre la ligne des épaules et celle des hanches, l'angle de séparation constitue un autre paramètre cinématique du tronc qui

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

fait l'objet d'une attention particulière dans la littérature. Dans plusieurs sports, tels que le badminton, le golf ou le baseball, cet angle est considéré comme un paramètre représentant la mise en tension des muscles du tronc, permettant le stockage de l'énergie élastique via l'étirement des muscles obliques (Bullock et al., 2020 ; Fleisig et al., 2013 ; J. Myers et al., 2008 ; Young et al., 1998 ; Zhang et al., 2016 ; Zheng et al., 2008). Cette énergie est ensuite libérée lors de la rotation longitudinale du tronc vers l'avant pendant la phase d'accélération (Chu et al., 2009 ; Fleisig et al., 2013). De ce fait, l'angle de séparation est souvent perçu comme un facteur incontournable de la performance, favorisant l'augmentation de la vitesse de rotation longitudinale lors du « dévissage », et par conséquent, la vitesse de la balle, du smash, du pitch ou du swing de golf. Cet angle est souvent mesuré dans les études portant sur la biomécanique du service au tennis (Elliott, 2006 ; Lambrich & Muehlbauer, 2023 ; Reid & Giblin, 2015 ; Reid et al., 2015 ; Tubez et al., 2021 ; Whiteside et al., 2013a, 2013b). Alors que son influence sur la performance reste méconnue, la plupart des propositions de « modèles » biomécaniques du service véhiculés dans la littérature encouragent les joueurs et les entraîneurs à créer un angle de séparation autour de 20–30° au moment de l'ARM pour améliorer la vitesse de balle (Elliott, 2006 ; N. L. Myers et al., 2017). On retrouve aussi ce genre d'incitations dans des ouvrages scientifiques à visée pédagogique publiés par la Fédération Internationale de Tennis (Elliott et al., 2009). Pourtant, les études publiées ne montrent pas de différence significative d'angle de séparation maximal ou d'angle de séparation à l'ARM entre jeunes joueurs et joueurs experts servant à des vitesses différentes (Tubez et al., 2021 ; Whiteside et al., 2013b). Touzard (2021) a même relevé une tendance à la diminution de l'angle de séparation maximal avec l'âge chez des joueurs élite, passant de 37 ± 12° chez les moins de 14 ans à 22 ± 8° chez les plus de 16 ans alors que la vitesse de balle augmente significativement avec l'âge. De leur côté, Tubez et al. (2021) n'ont observé aucune différence significative d'angle de séparation à l'ARM entre trois groupes de joueurs d'âges et de niveaux de performance différents (jeunes : 4 ± 10° ; juniors : 9 ± 14° ; professionnels : 15 ± 10°). À ce jour, l'évolution de cet angle tout au long du service et son effet sur la performance restent à explorer.

Au-delà du manque de données dans la littérature et des résultats parfois contradictoires concernant la contribution de la rotation longitudinale et de l'angle de séparation à la vitesse de balle, nous observons une dispersion importante des valeurs moyennes rapportées. Par exemple, au moment de l'ARM, les valeurs d'angle de séparation oscillent entre 4 et 15° (Tubez et al., 2021), tandis que les valeurs maximales varient entre 17 et 34° (Reid et al., 2015 ; Whiteside et al., 2013a, 2013b). Sur le plan pratique, cette va-

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

riabilité peut être visible à l'œil nu. Certains joueurs présentent un angle de séparation important à l'ARM, alors que ce n'est pas le cas pour d'autres (Figure 6.1). Toutefois, cette observation reste limitée à un instant spécifique du geste, celui de la position armée. Il apparaît donc intéressant d'étudier la variabilité inter-individuelle des angles de rotation longitudinale des hanches, des épaules et de l'angle de séparation à différents moments-clés du service, ainsi que les vitesses maximales et leurs timings d'apparition, en dépassant une approche fondée uniquement sur les valeurs moyennes pour intégrer également les indicateurs de variabilité et de dispersion.



FIGURE 6.1 – Exemple de 2 joueurs présentant des organisations du tronc différentes : une dissociation très marquée entre les lignes des hanches et des épaules dans le plan transverse (à gauche) et une dissociation plus limitée (à droite). Cette Figure a pour objectif d'illustrer la variabilité inter-individuelle. Les images présentées n'ont pas fait l'objet de mesures cinématiques précises.

L'objectif principal de cette étude consiste à déterminer l'influence de l'angle de séparation, des vitesses maximales de rotation longitudinale du pelvis et du thorax, ainsi que de leur timing d'apparition, sur la vitesse de balle au service chez des joueurs de tennis experts. L'objectif secondaire est d'analyser la variabilité inter-individuelle de ces différents paramètres. Nous émettons l'hypothèse qu'il n'existe pas de corrélation significative entre ces paramètres cinématiques et la vitesse de balle, et que ceux-ci présentent une variabilité inter-individuelle importante.

6.1.2 Méthodologie spécifique à l'étude

6.1.2.1 Participants

67 joueurs de tennis masculins (60 droitiers et 7 gauchers ; âge : 20,6 ± 3,9 ans ; taille : 1,86 ± 0,07 m ; masse corporelle : 77,6 ± 7,8 kg) ont participé volontairement à cette étude. 56 joueurs servaient avec la technique du relais d'appui et les 11 autres utilisaient la technique des appuis écartés. Parmi eux, 44 possédaient un classement ATP,

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

12 figuraient dans le classement ITF juniors et 11 joueurs appartenaient à la 2nde série française (FFT). Les critères d'inclusion étaient un âge minimum de 16 ans et une vitesse moyenne de service supérieure à 160 km · h^{-1}. Ce seuil est cohérent avec les données de Vaverka et Cernosek (2016), qui rapportent des vitesses moyennes de première balle comprises entre 153 et 211 km · h^{-1} chez 221 joueurs masculins de haut niveau. Un seuil de 160 km · h^{-1} a ainsi été retenu comme représentatif d'un niveau de performance élevé au service. Aucun des participants ne présentait de blessure ou de douleur susceptible d'altérer sa performance au service au moment de l'expérimentation.

6.1.2.2 Capture de mouvement en 3D et protocole expérimental

La méthodologie et le protocole de capture du mouvement de service en 3D utilisés pour cette étude sont décrits dans le chapitre 4.

6.1.2.3 Découpage temporel du service et variables d'intérêt

Le service a été temporellement découpé en accord avec les travaux antérieurs portant sur l'analyse des paramètres cinématiques du tronc (Fett et al., 2021 ; Tubez et al., 2021 ; Whiteside et al., 2013a, 2013b). Quatre moments-clés ont été utilisés pour délimiter les trois phases du service (Figure 6.2) :

— le lancer de balle (LB) qui correspond au moment où la balle quitte la main du serveur et qui indique le début de la phase de préparation

— la position armée de la raquette (ARM) qui marque la transition entre la phase de préparation et la phase de propulsion

— le point le plus bas de la raquette dans le dos (PLBR) qui correspond à la fin de la phase de propulsion et au début de la phase de mouvement vers l'avant

— le point d'impact entre la balle et la raquette (IMP) qui marque la fin de la phase de mouvement vers l'avant

Le service a été temporellement normalisé entre LB (correspondant à 0 % du service) et IMP (correspondant à 100 % du service). Les variables cinématiques suivantes ont été analysées au cours de cette période (Figure 6.3) :

— θ Hanches : angle formé entre la ligne des hanches et la ligne de fond de court, calculé à partir du produit scalaire entre les vecteurs représentant la ligne des hanches et la ligne de fond de court, projetés dans le plan transverse

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

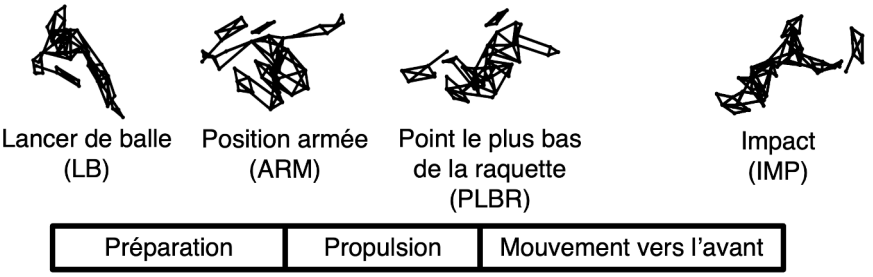


FIGURE 6.2 – Phases et moments-clés du service (vue de dessus)

— θ Épaules : angle formé entre la ligne des épaules et la ligne de fond de court, calculé à partir du produit scalaire entre les vecteurs représentant la ligne des épaules et la ligne de fond de court, également projetés dans le plan transverse

— θ Séparation : angle formé entre la ligne des épaules et celle des hanches dans le plan transverse

— ω Thorax et ω Pelvis : vitesses angulaires longitudinales du thorax et du pelvis obtenues à partir de l'orientation de chaque segment par rapport au référentiel laboratoire en utilisant une séquence d'angles d'Euler ZXY

Notre analyse a porté à la fois sur les valeurs maximales d'angles, leur moment d'apparition au cours du service ($t\ \theta^{\max}$), ainsi que leurs valeurs aux moments-clés (LB, ARM, PLBR, IMP). De même, les vitesses maximales de rotations longitudinales du pelvis et du thorax ($\omega^{\max}$ Pelvis et $\omega^{\max}$ Thorax, respectivement) ont été mesurées, ainsi que leur timing d'apparition ($t\ \omega^{\max}$ Pelvis et $t\ \omega^{\max}$ Thorax, respectivement). La différence de timing entre $t\ \omega^{\max}$ Thorax et $t\ \omega^{\max}$ Pelvis ($\Delta\ t\ \omega^{\max}$ Thorax–Pelvis) a été aussi calculée.

6.1.2.4 Analyses statistiques

Les moyennes et les écarts-types ont été calculés pour toutes les variables cinématiques et la vitesse de balle. Les coefficients de variation (CV) ont été calculés pour les vitesses angulaires maximales, les timings d'apparition des variables cinématiques et la vitesse de balle. Les CV des angles n'ont pas été calculés, car leurs valeurs peuvent varier en fonction de la méthode utilisée pour le calcul de chaque angle (interne ou externe). La variabilité inter-individuelle a été qualifiée de « faible » pour des CV inférieurs à 20 %, de « modérée » pour des CV compris entre 20 et 40 %, d'« élevée » pour des CV compris entre 40 et 60 % et de « très élevée » pour des CV supérieurs à 60 % (Bańkosz & Winiarski,

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

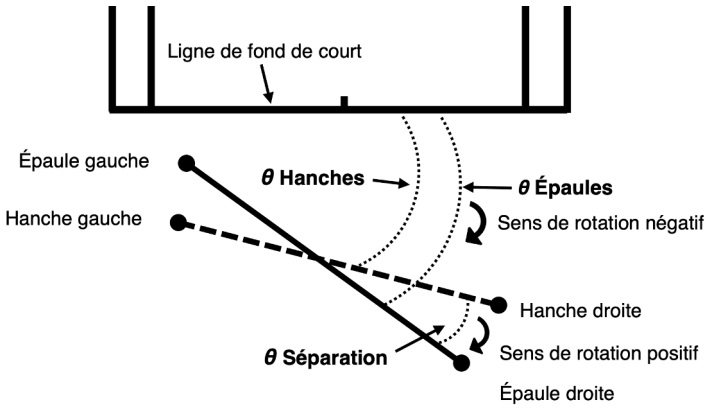


FIGURE 6.3 – Représentation de l'angle des épaules, de l'angle des hanches et de l'angle de séparation dans le plan transverse pour un joueur droitier. θ Épaules et θ Hanches sont définis comme négatifs lorsque la rotation par rapport à la ligne de fond de court s'effectue dans le sens des aiguilles d'une montre. θ Séparation (calculé comme θ Épaules $-$ θ Hanches) est défini comme positif quand les épaules tournent au-delà de la ligne des hanches dans le sens des aiguilles d'une montre. θ = angle (en degrés).

2020). Le test de Shapiro-Wilk a été utilisé pour évaluer la normalité des distributions des données. Les corrélations entre les variables cinématiques mesurées (θ, ω et t) et la vitesse de balle ont été évaluées à l'aide des coefficients de corrélation de Pearson. Lorsque les variables ne suivaient pas une distribution normale, des tests de corrélation de Spearman ont été utilisés. Les corrélations significatives ont été qualifiées de faibles ($0{,}25 \leq r < 0{,}5$), modérées ($0,5 \leq r < 0,75$), ou fortes ($r \geq 0,75$) en se basant sur les classifications usuelles de Portney et Watkins (2015). Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel RStudio (version 2024.04.1, R Foundation for Statistical Computing, Vienne, Autriche). Les valeurs de p ont été ajustées à l'aide de la méthode de Benjamini-Hochberg, en tenant compte des 23 corrélations effectuées dans l'étude. Cette correction a été appliquée afin de contrôler le taux de faux positifs. Le seuil de significativité a été fixé à $p = 0{,}05$.

6.1.3 Résultats

6.1.3.1 Vitesse de balle et angles (θ) obtenus

Les joueurs ont servi à une vitesse moyenne de 182,5 ± 10,3 km · h^{-1}. Le Tableau 6.1 présente les valeurs moyennes, les écarts-types et les valeurs maximales et minimales pour les angles des épaules, des hanches et les angles de séparation aux différents moments-clés du service. La Figure 6.4 montre l'évolution de ces angles au cours du temps à travers les courbes individuelles de chaque joueur.

	θ Épaules		**θ Hanches**		**θ Séparation**	
Valeurs	**Moyenne ± ET**	**[Min ; Max]**	**Moyenne ± ET**	**[Min ; Max]**	**Moyenne ± ET**	**[Min ; Max]**
maximale (°)	$-108{,}8 \pm 15{,}2$	$[-138{,}1\,;\,-83{,}0]$	$-95{,}6 \pm 14{,}5$	$[-125{,}7\,;\,-62{,}6]$	$27{,}9 \pm 9{,}9$	$[4{,}8\,;\,49{,}0]$
au moment du LB (°)	$-77{,}4 \pm 21{,}0$	$[-133{,}2\,;\,-27{,}9]$	$-82{,}8 \pm 16{,}5$	$[-122{,}0\,;\,-44{,}7]$	$-5{,}5 \pm 9{,}5$	$[-27{,}3\,;\,11{,}3]$
au moment de l'ARM (°)	$-102{,}5 \pm 15{,}6$	$[-135{,}3\,;\,-59{,}7]$	$-86{,}4 \pm 13{,}8$	$[-118{,}5\,;\,-12{,}8]$	$16{,}1 \pm 12{,}2$	$[-11{,}9\,;\,40{,}9]$
au moment du PLBR (°)	$-68{,}7 \pm 7{,}9$	$[-88{,}1\,;\,-53{,}3]$	$-47{,}8 \pm 13{,}1$	$[-80{,}0\,;\,-12{,}8]$	$20{,}9 \pm 10{,}4$	$[-3{,}6\,;\,43{,}6]$
au moment de l'IMP (°)	$0{,}5 \pm 13{,}5$	$[-33{,}9\,;\,25{,}4]$	$-10{,}0 \pm 12{,}1$	$[-38{,}9\,;\,21{,}4]$	$-10{,}5 \pm 9{,}1$	$[-30{,}6\,;\,4{,}9]$

TABLE 6.1 – Moyennes, écarts-types et valeurs maximales et minimales des angles des épaules, des hanches et des angles de séparation à différents moments-clés du service. ET : écart type ; Min : valeur minimale ; Max : valeur maximale ; θ : angle ; LB : lancer de balle ; ARM : position armée ; PLBR : point le plus bas de la raquette ; IMP : impact.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

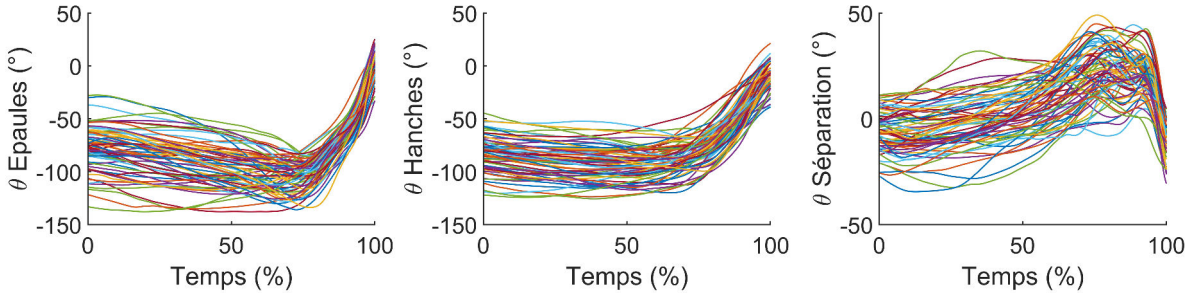


FIGURE 6.4 – Évolution des angles des épaules, des hanches et des angles de séparation au cours du service. Le temps est exprimé en pourcentage de la durée du service, où 0 % correspond au lancer de balle et 100 % à l'impact. θ : angle.

6.1.3.2 Vitesses longitudinales maximales (ω^{max})

Le Tableau 6.2 présente les moyennes, les écarts types et les CV des vitesses maximales de rotation longitudinale du pelvis et du thorax. Les CV montrent une faible variabilité inter-individuelle (ω^{max} Pelvis : CV = 14,5 % ; ω^{max} Thorax : CV = 12,7 %). La Figure 6.5 illustre l'évolution des vitesses mesurées pour chaque joueur au cours du service (de LB jusqu'à l'IMP).

	Pelvis		**Thorax**	
	Moyenne ± ET (CV)	**[Min ; Max]**	**Moyenne ± ET (CV)**	**[Min ; Max]**
ω^{max} ($^\circ \cdot s^{-1}$)	$498,5 \pm 72,3$ (14,5)	[299,1 ; 743,9]	$631,2 \pm 80,4$ (12,7)	[452,9 ; 827,2]

TABLE 6.2 – Moyennes, écarts-types et coefficients de variation des vitesses maximales de rotation longitudinales du pelvis et du thorax. Les coefficients de variation sont exprimés en pourcentage. CV : coefficient de variation ; ET : écart type ; ω^{max} : vitesse maximale de rotation longitudinale ; Min : valeur minimale ; Max : valeur maximale.

6.1.3.3 Paramètres temporels (t)

Les valeurs moyennes, les écarts types et les CV des timings d'apparition des angles maximaux et des vitesses maximales sont présentés dans le Tableau 6.3. Pour $t\ \omega^{\max}$ Pelvis et $t\ \omega^{\max}$ Thorax, les CV sont faibles (CV < 5 %). Les CV montrent une variabilité inter-individuelle faible pour $t\ \theta^{\max}$ Séparation (CV = 13,8 %), modérée pour $t\ \theta^{\max}$ Épaules (CV = 21,4 %) et élevée pour $t\ \theta^{\max}$ Hanches (CV = 44,2 %).

La Figure 6.6 présente la dispersion interindividuelle de ces timings, répartis entre LB et IMP. L'angle de séparation maximal survient plus tardivement que les angles maximaux

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

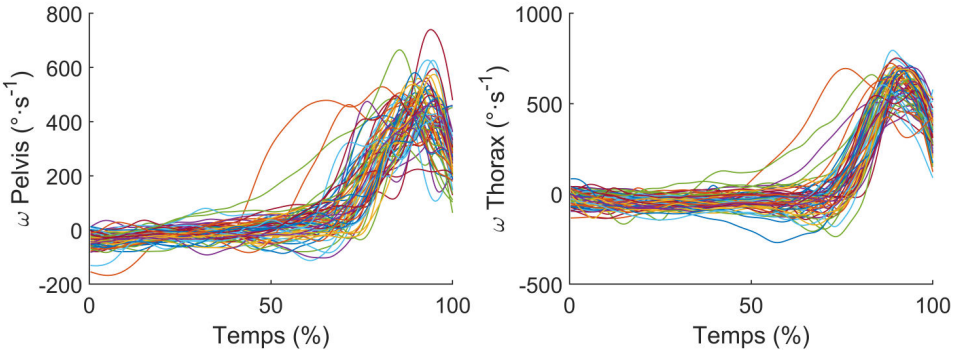


FIGURE 6.5 – Évolution des vitesses de rotation longitudinale du pelvis et du thorax au cours du service. Le temps est exprimé en pourcentage de la durée du service, où 0 % correspond au lancer de balle et 100 % à l'impact. ω : vitesse angulaire longitudinale.

des épaules et des hanches, à l'exception d'un seul joueur où l'inverse est observé. Par ailleurs, chez 28 joueurs, la vitesse de rotation longitudinale maximale du pelvis précède celle du thorax, tandis que c'est l'inverse pour les 39 autres joueurs.

	Moyenne ± ET (CV)
$t\ \theta^{max}$ Épaules (%)	66,3 ± 14,2 (21,4)
$t\ \theta^{max}$ Hanches (%)	44,6 ± 19,7 (44,2)
$t\ \theta^{max}$ Séparation (%)	81,3 ± 11,2 (13,8)
$t\ \omega^{max}$ Pelvis (%)	91,1 ± 4,2 (4,6)
$t\ \omega^{max}$ Thorax (%)	90,3 ± 3,3 (3,7)

TABLE 6.3 – Moyennes, écarts-types et coefficients de variation des paramètres temporels exprimés en pourcentage de la durée du service. Les coefficients de variation sont exprimés en pourcentage. θ^{max} : angle maximal ; ω^{max} : vitesse maximale de rotation longitudinale ; t : timing d'apparition.

6.1.3.4 Corrélations entre les paramètres cinématiques du tronc et la vitesse de balle

Il n'existe aucune corrélation significative entre les paramètres cinématiques du tronc et la vitesse de balle (Tableau 6.4 & Figure 6.7).

	r	p	p ajusté (B–H)
Angles de séparation			
$\theta^{\max}$ Séparation	0,08	0,541	0,986
θ^{LB} Séparation	–0,09	0,452	0,986
θ^{ARM} Séparation	0,11	0,394	0,986
θ^{PLBR} Séparation	0,00	0,985	0,991
θ^{IMP} Séparation	–0,17	0,182	0,986
$t\ \theta^{\max}$ Séparation	–0,20	0,108	0,906
Angles des hanches			
$\theta^{\max}$ Hanches	0,04	0,765	0,986
θ^{LB} Hanches	–0,01	0,964	0,991
θ^{ARM} Hanches	0,05	0,701	0,986
θ^{PLBR} Hanches	0,06	0,639	0,986
θ^{IMP} Hanches	–0,08	0,523	0,986
$t\ \theta^{\max}$ Hanches	–0,08	0,544	0,986
Angles des épaules			
$\theta^{\max}$ Épaules	–0,04	0,751	0,986
θ^{LB} Épaules	0,04	0,759	0,986
θ^{ARM} Épaules	–0,04	0,734	0,986
θ^{PLBR} Épaules	0,09	0,453	0,986
θ^{IMP} Épaules	0,01	0,930	0,991
$t\ \theta^{\max}$ Épaules	–0,00	0,971	0,991
Vitesses angulaires longitudinales			
$\omega^{\max}$ Pelvis	0,00	0,991	0,991
$\omega^{\max}$ Thorax	0,14	0,275	0,986
$t\ \omega^{\max}$ Pelvis	–0,23	0,063	0,906
$t\ \omega^{\max}$ Thorax	–0,04	0,772	0,986
$\Delta\ t\ \omega^{\max}$ Thorax–Pelvis	0,19	0,118	0,906

TABLE 6.4 – Coefficients de corrélation de Pearson et de Spearman entre les paramètres cinématiques du tronc et la vitesse de balle. r : coefficient de corrélation de Pearson ou de Spearman ; p : valeur de p brute ; p ajusté (BH) : valeur de p corrigée selon la méthode de Benjamini-Hochberg ; θ : Angle ; $t\ \omega^{\max}$: vitesse maximale de rotation longitudinale ; LB : lancer de balle ; ARM, position armée ; PLBR : point le plus bas de la raquette ; IMP : impact ; $\Delta\ t$: différence de timing d'apparition des vitesses maximales de rotation longitudinale entre le pelvis et le thorax.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

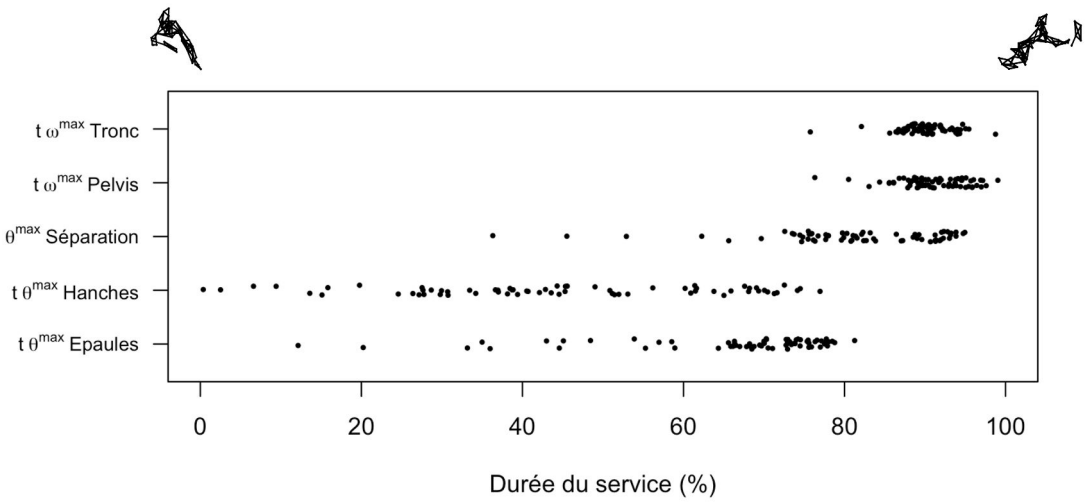


FIGURE 6.6 – Dispersion des timings d'apparition des angles maximaux et des vitesses maximales au cours du service. Le temps est exprimé en pourcentage de la durée du service, où 0 % correspond au lancer de balle et 100 % à l'impact. $\theta^{\max}$: angle maximal, $\omega^{\max}$: vitesse angulaire maximale longitudinale, t : timing d'apparition.

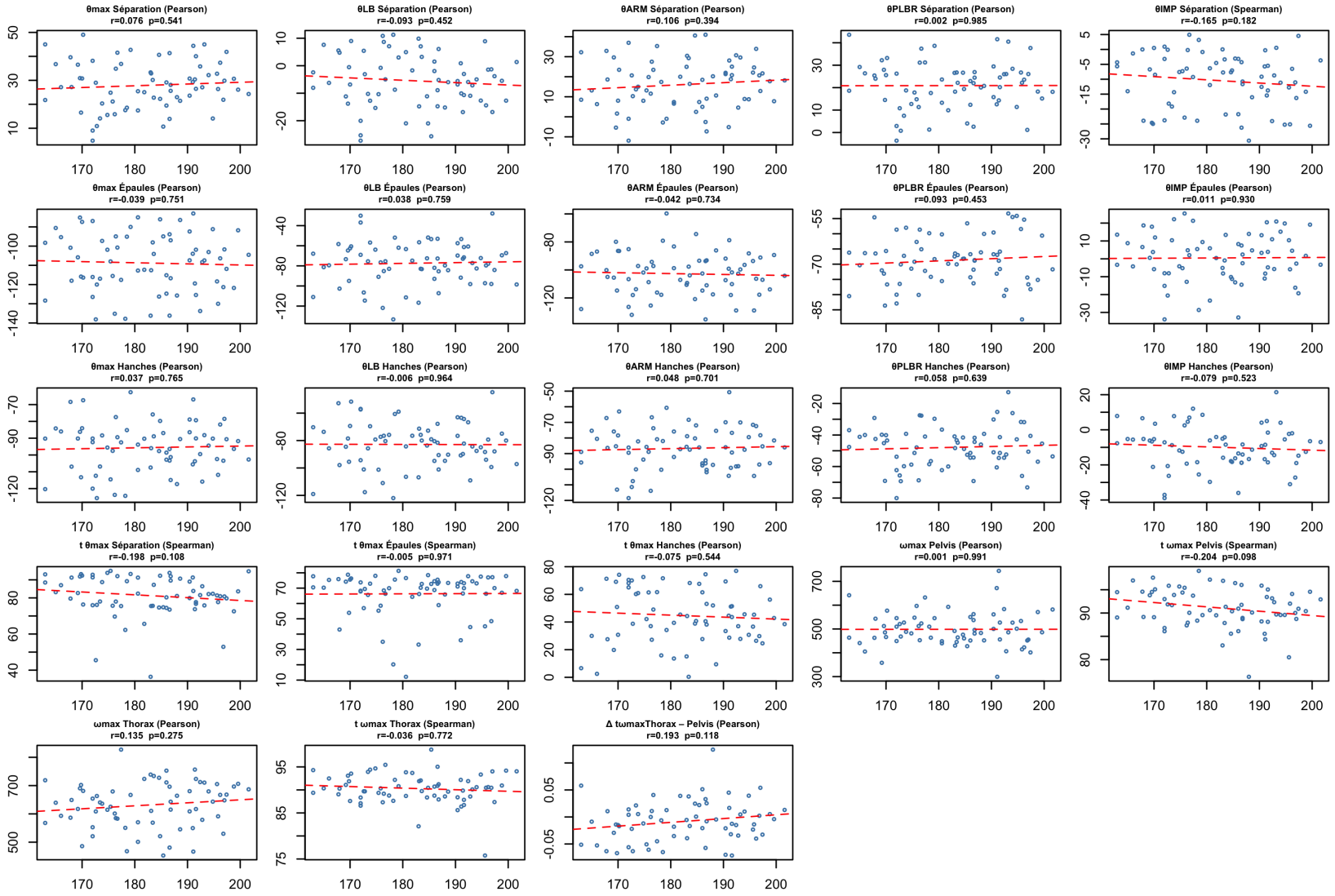


FIGURE 6.7 – Corrélations de Pearson et de Spearman entre la vitesse de balle (en abscisse) et l'ensemble des paramètres cinématiques liés à la rotation longitudinale du tronc (en ordonnée). r : coefficient de corrélation de Pearson ou de Spearman ; p : valeur de p brute ; θ : Angle ; t $\omega^{\max}$: vitesse angulaire maximale longitudinale ; LB : lancer de balle ; ARM : position armée ; PLBR : point le plus bas de la raquette ; IMP : impact ; Δ t : différence de timing d'apparition des vitesses maximales de rotation longitudinale entre le pelvis et le thorax.

6.1.4 Discussion

L'objectif principal de cette étude était d'étudier l'effet de la cinématique du tronc autour de l'axe longitudinal sur la vitesse de balle au service chez des joueurs de tennis experts à travers l'analyse de l'angle de séparation, des vitesses maximales de rotation longitudinale du pelvis et du thorax et de leur timing d'apparition. L'objectif secondaire était de quantifier la variabilité-inter individuelle de ces paramètres. Nos résultats ne montrent aucune relation significative entre ces paramètres et la vitesse de balle, et mettent en évidence une variabilité inter-individuelle allant de faible à élevée.

Les vitesses maximales de rotation longitudinale du pelvis et du thorax observées dans notre étude se situent dans des plages comparables à celles rapportées dans la littérature, avec toutefois quelques différences. La vitesse maximale de rotation longitudinale du pelvis rapportée ici ($498 \pm 72° \cdot s^{-1}$) se situe entre les valeurs de Fleisig et al. (2003) ($440 \pm 90° \cdot s^{-1}$) et celles de Van Trigt et al. (2025) ($587 \pm 58{,}4° \cdot s^{-1}$). En revanche, la vitesse maximale de rotation longitudinale du thorax ($631 \pm 80° \cdot s^{-1}$) est inférieure à celles observées dans la littérature, comprises entre $715 \pm 145° \cdot s^{-1}$ et $897 \pm 152{,}9° \cdot s^{-1}$ (Fleisig et al., 2003 ; Van Trigt et al., 2025 ; Whiteside et al., 2013b). Ces écarts de vitesses moyennes peuvent s'expliquer par des différences méthodologiques entre les études telles que l'utilisation de centrales inertielles dans celle de Van Trigt et al. (2025), l'analyse du service basée uniquement sur deux caméras dans celle de Fleisig et al. (2003), ou encore par des caractéristiques distinctes au niveau des populations étudiées, comme dans l'étude de Whiteside et al. (2013b), qui portait sur 8 joueuses de haut niveau classées dans le top 300 WTA.

L'absence de corrélation significative entre les vitesses maximales de rotation longitudinale du thorax et du pelvis, et la vitesse de balle observée dans notre étude, confirme les conclusions de plusieurs travaux antérieurs (Bahamonde, 2000 ; Martin, Kulpa, Delamarche & Bideau, 2013 ; Whiteside et al., 2013b) ayant montré que ces vitesses ne constituent pas des facteurs déterminants pour la performance des joueurs experts. Seule l'étude de Van Trigt et al. (2025), basée sur des mesures avec centrales inertielles, a rapporté des résultats contradictoires. Par ailleurs, nos résultats diffèrent des observations établies pour le pitch chez des joueurs professionnels de baseball, où la rotation longitudinale du tronc joue un rôle fondamental dans la génération de vitesse de balle (Bullock et al., 2020 ; Fleisig et al., 2013 ; Stodden et al., 2001). Ces divergences peuvent s'expliquer par les spécificités de chaque tâche motrice. En effet, contrairement au pitch, le service implique un impact entre la balle et la raquette, soumis à des contraintes d'anticipation-coïncidence, ce

qui n'est pas le cas du pitch au baseball. Au service, la trajectoire parabolique de la balle lancée par le joueur (Carboch et al., 2018) contraint la position de la raquette au moment de l'impact. Il est probable que ce phénomène conditionne l'organisation des rotations segmentaires autour de l'axe longitudinal, de façon à assurer une convergence optimale du mouvement de la raquette vers la balle. Si l'action de rotation longitudinale est indispensable au service pour amener la raquette vers le futur point d'impact, sa vitesse n'est pas un facteur déterminant pour la vitesse de balle.

Sur le plan temporel, la vitesse maximale de rotation longitudinale du thorax survient en moyenne à 90,3 ± 3,3 % de la durée du service alors que celle du pelvis est atteinte à 91,1 ± 4,2 %. Ce résultat suggère que la séquence proximo-distale n'est pas systématiquement respectée chez les joueurs professionnels. En effet, pour 42 % des joueurs, la vitesse maximale du pelvis précède celle du thorax, tandis qu'elle lui succède chez 58 % d'entre eux. Pour certains joueurs, les deux pics de vitesse sont quasi simultanés. Ces données éclairent les résultats contradictoires rapportés dans la littérature concernant l'ordre d'apparition des vitesses maximales de rotations du pelvis et du thorax (Fleisig et al., 2003 ; Martin, Kulpa, Ropars et al., 2013 ; Van Trigt et al., 2025). Par ailleurs, aucune corrélation significative n'a été observée entre la différence de timing d'apparition des vitesses maximales de rotation longitudinale du pelvis et du thorax et la vitesse de balle ($r = 0{,}19$; $p = 0{,}118$). Bien que l'ordre d'apparition des vitesses maximales de rotations du pelvis et du thorax ne semble pas influencer directement la performance du service, ce paramètre demeure cliniquement pertinent, car il peut influencer les risques de blessures (Connolly et al., 2021 ; Martin, 2018 ; Martin, Kulpa, Ropars et al., 2013). En effet, Martin, Kulpa, Ropars et al. (2013) ont montré que les joueurs experts non blessés respectent la séquence proximo-distale du tronc, avec une vitesse maximale du pelvis qui est atteinte à 85,7 ± 3,9 % de la durée du service et celle du thorax plus tard à 87,4 ± 3,4 %. En revanche chez des joueurs de niveau comparable mais blessés, les vitesses maximales du pelvis et du thorax apparaissent respectivement à 91,5 ± 4,1 % et à 91,1 ± 2,7 %, sans impact sur la vitesse de balle.

Nos résultats montrent qu'il n'existe aucune corrélation significative entre les angles de séparation mesurés à différents moments-clés du service et la vitesse de balle. Contrairement à ce qui est régulièrement avancé dans les études scientifiques, les modèles « biomécaniques » du service de la littérature et les publications pédagogiques à destination des entraîneurs et des joueurs (Elliott, 2006 ; Elliott et al., 2009 ; N. L. Myers et al., 2017), le fait de dissocier la ligne des épaules par rapport à la ligne des hanches n'est pas un

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

facteur déterminant pour la performance au service. De plus, même si tous les joueurs présentent un mouvement de rotation longitudinale du tronc vers l'arrière (« vissage ») suivi d'une rotation vers l'avant (« dévissage »), les angles des hanches et des épaules relevés aux différents moments-clés du service ne sont pas significativement corrélés à la vitesse de balle. Selon les principes mécaniques identifiés dans les mouvements de lancer (Fleisig et al., 2013), ces rotations restent essentielles car elles favorisent l'amplitude gestuelle lors du service en allongeant la distance parcourue par la raquette lors des phases de préparation et d'accélération. Néanmoins, nos résultats montrent que ce ne sont pas les joueurs qui tournent le plus les épaules et les hanches vers l'arrière puis vers l'avant qui produisent les services les plus rapides.

Les valeurs moyennes des angles des épaules, des hanches et de l'angle de séparation sont cohérentes avec celles rapportées dans la littérature, que ce soit pour les valeurs maximales ou celles mesurées au moment de l'ARM (Reid & Giblin, 2015 ; Tubez et al., 2021 ; Wagner et al., 2014 ; Whiteside et al., 2013a, 2013b). Néanmoins, une analyse plus détaillée de nos résultats montre une dispersion importante de ces différentes variables. Par exemple, au moment de l'ARM, les valeurs observées s'étendent de -135 à $-60°$ pour l'angle des épaules, de -118 à $-13°$ pour l'angle des hanches, et de -12 à $41°$ pour l'angle de séparation. Afin d'illustrer de manière claire cette variabilité inter-individuelle, nous avons représenté l'évolution des angles des épaules, des hanches et de l'angle de séparation au cours du service (entre LB et IMP) pour quatre joueurs présentant des organisations techniques relativement différentes mais des vitesses de balles très proches (Figure 6.8). L'angle de séparation maximal du joueur A se limite à 5°, tandis que celui du joueur D atteint 45°. L'analyse conjointe des angles des épaules et des hanches permet de mieux comprendre la création et l'évolution de l'angle de séparation au cours du service. Chez le joueur D, une rotation maximale limitée des hanches combinée à une rotation maximale plus marquée des épaules entre ARM et PLBR génère un angle de séparation maximal de 45°. A l'inverse, chez le joueur A, une rotation maximale plus importante des hanches combinée à une rotation maximale des épaules plus faible limite la valeur maximale de l'angle de séparation (5°). Malgré cette différence importante, leurs vitesses de service sont comparables (172 km $\cdot$ h^{-1} pour le joueur A et 170 km $\cdot$ h^{-1} pour le joueur D). Ainsi, alors que certains joueurs semblent privilégier une dissociation marquée caractérisée par un angle de séparation maximal élevé (joueur D), d'autres adoptent un fonctionnement plus « associé » ou « synchronisé » (joueur A) entre les lignes des hanches et des épaules, se traduisant par un angle de séparation maximal limité. Il est possible que certains joueurs

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

présentent des capacités de dissociation segmentaires sur le plan structurel et anatomique qui pourraient limiter ou favoriser l'angle de séparation. Afin de valider cette hypothèse explicative, il serait intéressant d'évaluer la capacité de dissociation hanches/épaules, chez les joueurs, via des tests cliniques spécifiques et de les mettre en relation avec les paramètres de dissociation au service. Cela permettrait de mieux comprendre l'origine de la variabilité inter-individuelle. **Ce travail fera l'objet de l'étude 5 de cette thèse**.

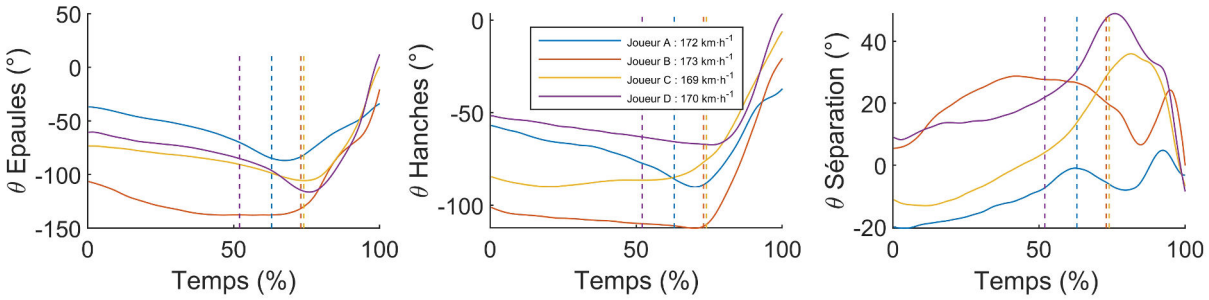


FIGURE 6.8 – Évolution de l'angle des épaules, des hanches et de l'angle de séparation au cours du service chez 4 joueurs de notre population (A, B, C et D). Les traits en pointillé indiquent l'instant où les joueurs atteignent l'ARM.

Par ailleurs, la compréhension de la coordination entre les hanches et les épaules s'avère complexe, notamment en raison du rôle majeur joué par la dimension temporelle dans l'exécution des rotations. L'évolution des angles au cours du service semble, en effet montrer des profils de coordination hétérogènes entre les joueurs. Les angles maximaux des épaules et des hanches sont atteints à des moments très dispersés dans le temps (Figure 6.8). Leurs timings d'apparition présentent des CV allant de modérés à élevés ($t\ \theta^{max}$ Épaules = 21,4 % ; $t\ \theta^{max}$ Hanches = 44,2 %). Certains joueurs amorcent la rotation longitudinale des hanches très tôt et atteignent leur maximum proche du LB, tandis que d'autres présentent une rotation maximale beaucoup plus tardive, vers la fin de la phase de préparation et à l'approche de l'ARM. Par exemple, le joueur C atteint la rotation maximale de ses hanches dès 19 % de la durée du service (entre LB et IMP), tandis que les joueurs A, B et D atteignent ce pic autour de 70 %. Enfin, la comparaison entre les joueurs B et D illustre également des différences temporelles dans la manière de créer l'angle de séparation. Le joueur B atteint son angle de séparation maximal à 45 % de la durée du service, sans que cela soit synchronisé avec les timings des rotations maximales des épaules et de hanches qui surviennent plus tard (57 % et 70 %, respectivement). À l'inverse, chez le joueur D, l'angle de séparation maximal est atteint beaucoup plus

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

tardivement (76 % de la durée du service) en parfaite synchronisation avec les timings de rotation maximale des épaules et des hanches (76 % et 74 %, respectivement). Compte tenu de la complexité introduite par les nombreuses variables cinématiques, le recours à des méthodes de type clustering permettrait de mettre en évidence d'éventuels stratégies motrices récurrentes et de mieux comprendre la variabilité inter-individuelle observée ici. L'étude suivante sera consacrée à cette problématique.

Cette étude présente certaines limites. Premièrement, les participants utilisaient deux techniques d'appuis différentes : 56 joueurs (83 %) servaient avec la technique du relais d'appui, tandis que les 11 autres (17 %) utilisaient la technique des appuis écartés. Cette répartition correspond approximativement à celle observée à haut niveau (73 % relais d'appuis, 27 % appuis écartés) (Martin, 2018). Il est possible que cette variable ait influencé le timing et les vitesses maximales de rotation longitudinale mesurées notamment au niveau des hanches (Touzard, 2021). Deuxièmement, comme dans l'étude 1, le CV utilisé pour quantifier la variabilité inter-individuelle peut devenir problématique lorsque la moyenne est faible ou proche de zéro. Sa valeur tend à s'amplifier artificiellement et pourrait fausser l'interprétation de la variabilité réelle. Enfin, dans la mesure où l'utilisation du CV n'est pas appropriée pour quantifier la variabilité inter-individuelle des angles, la variabilité de θ Épaules, θ Hanches et θ Séparation a été décrite uniquement à partir des écarts-types ainsi que des valeurs minimale et maximale.

En termes d'application pratiques, nos résultats soutiennent l'idée qu'il faudrait s'affranchir du modèle « traditionnel » qui consiste à encourager les entraîneurs et les joueurs à nécessairement augmenter la dissociation entre la ligne des épaules et des hanches dans le plan transverse dans une optique d'amélioration de la performance via le cycle étirement–raccourcissement des muscles obliques. Ils suggèrent au contraire qu'il serait plus intéressant de laisser davantage de liberté aux joueurs dans la gestion des rotations longitudinales du tronc et de l'angle de séparation, en les encourageant à expérimenter différentes stratégies motrices afin d'identifier celles qui leur conviennent le mieux. Certains ajustements techniques, comme la position et l'orientation des pieds ou la manière dont le bras libre accompagne le lancer de balle, pourraient influencer le degré de « vissage » entre les épaules et les hanches. Ce sont des détails auxquels les entraîneurs devraient prêter attention, afin de trouver ce qui fonctionne le mieux pour leurs joueurs.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

6.1.5 Conclusion

Cette étude montre que ni l'angle de séparation, ni les angles et les vitesses maximales de rotations longitudinales du pelvis et du thorax n'influencent la vitesse de balle au service chez des joueurs experts. Sur la base de ces résultats, les entraineurs devraient éviter de chercher à augmenter à tout prix l'angle de séparation sous prétexte de vouloir améliorer la performance. Elle met en lumière une variabilité inter-individuelle dans les mouvements du tronc autour de l'axe longitudinal et ouvre des perspectives intéressantes pour la compréhension de cette variabilité. L'utilisation de méthodes telles que le clustering pourrait permettre d'identifier différentes stratégies motrices partageant des schémas de coordination similaires.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

6.2 Étude 4 : Identification des stratégies motrices de rotation longitudinale du tronc au service grâce au clustering par modèle de mélange gaussien

6.2.1 Introduction

Le service au tennis repose sur une chaîne cinématique proximo-distale initiée au niveau des membres inférieurs, se propageant ensuite vers le bassin, le tronc, le bras, l'avant-bras, puis vers la main et la raquette (Kovacs & Ellenbecker, 2011b ; Marshall & Elliott, 2000). Le tronc joue un rôle central dans cette séquence en assurant le transfert de l'énergie vers les segments distaux (Kibler & Van der Meer, 2001 ; Martin, Bideau, Bideau et al., 2014). Les rotations du tronc autour des axes transverse et antéro-postérieur sont fondamentales et contribuent fortement à l'augmentation de la vitesse de balle (Bahamonde, 2000 ; Martin, Kulpa, Delamarche & Bideau, 2013). En revanche, les résultats de l'étude précédente montrent que les rotations autour de l'axe longitudinal n'affectent pas la vitesse de balle, confirmant les résultats de Bahamonde (2000), Martin, Kulpa, Delamarche et Bideau (2013) et ceux de Whiteside et al. (2013b).

Notre analyse a également mis en évidence une variabilité inter-individuelle modérée à élevée pour plusieurs variables cinématiques liées à la rotation du tronc dans le plan transverse, notamment les angles des épaules et des hanches, l'angle de séparation et leurs timings d'apparition. Ces constats invitent à remettre en question certaines recommandations fréquemment véhiculées dans la littérature scientifique et dans les ressources pédagogiques destinées aux entraîneurs et aux joueurs, qui prônent l'augmentation de l'angle de séparation et des vitesses de rotation longitudinales lors du « dévissage » (Elliott, 2006). Ce modèle unique pourrait ne pas convenir à tous les joueurs, et dans certains cas, s'avérer contre-productif, voire augmenter le risque de blessure lorsqu'il entre en contradiction avec les contraintes individuelles de coordination et de fonctionnement (Glazier & Mehdizadeh, 2019).

L'étude 3 de cette thèse a également suggéré que variabilité inter-individuelle de la cinématique du tronc autour de l'axe longitudinal pourrait traduire l'existence de stratégies motrices variées chez les joueurs de tennis experts. Ces résultats s'inscrivent dans la théorie dynamique de l'apprentissage, défendue par Davids et al. (2003) et Glazier et Mehdizadeh (2019), préconisant une analyse individualisée du mouvement et prenant en compte les contraintes imposées au joueur et les solutions de coordination qui émergent sponta-

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

nément (Newell, 1986). Alors que la littérature scientifique déplore le manque d'études portant sur l'identification des différents styles et des techniques de service chez les joueurs de tennis experts (Lambrich & Muehlbauer, 2023), il existe pourtant des méthodes permettant de révéler ces « signatures motrices » même dans un geste aussi technique que le service (Kelso, 1995). Parmi celles-ci, les méthodes de clustering sont particulièrement adaptées, car elles permettent de détecter des variations dans les patterns de mouvements en révélant la présence de variabilité inter-individuelle (Webb, 2003). Déjà utilisées dans d'autres sports pour regrouper les athlètes selon leurs styles de mouvement à partir de données biomécaniques (Floría et al., 2024 ; Jauhiainen et al., 2020 ; Lee et al., 2014 ; Martens et al., 2016 ; Morais et al., 2022 ; Rauch et al., 2020 ; Webb, 2003), ces méthodes n'ont encore jamais été appliquées à l'analyse du service au tennis. Dans le cadre de cette thèse, elles pourraient permettre d'identifier différentes stratégies de coordination concernant la rotation longitudinale du tronc. Il est possible que certains joueurs s'appuient sur une forte dissociation hanches épaules dans le plan transverse tandis que d'autres présentent un fonctionnement plus « en bloc », caractérisé par une faible dissociation entre les hanches et les épaules. Identifier ces stratégies et les paramètres cinématiques qui les distinguent donnerait aux entraîneurs des repères concrets pour adapter leurs consignes et individualiser l'entraînement.

L'objectif de cette étude est donc d'appliquer une méthode de clustering pour identifier différentes stratégies de coordination mises en œuvre par les joueurs de tennis experts concernant la cinématique du tronc autour de l'axe longitudinal. Il s'agit ensuite de comparer les paramètres cinématiques associés à chaque stratégie pour mieux les caractériser. Nous émettons l'hypothèse que les joueurs de tennis experts présentent plusieurs manières différentes de tourner et de dissocier le tronc autour de l'axe longitudinal, et que ces différentes stratégies conduisent à des niveaux de performance similaires, notamment en ce qui concerne la vitesse de balle et la hauteur d'impact.

6.2.2 Méthodologie spécifique à l'étude

6.2.2.1 Participants

Cette étude s'appuie sur les données recueillies auprès des participants ayant pris part à l'étude 3 de ce travail de thèse.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

6.2.2.2 Capture de mouvement en 3D et protocole expérimental

La méthodologie et le protocole de capture du mouvement de service en 3D utilisés pour cette étude sont décrits dans le chapitre 4.

6.2.2.3 Découpage temporel du service et variables d'intérêt

Le découpage temporel du service, les variables analysées et la façon de les calculer sont identiques à l'étude précédente. Les positions d'impact verticale, antéro-postérieure et latérale ont été calculées suivant la méthode décrite dans les études de Whiteside et al. (2013b) et Fett et al. (2021) (Figure 6.9).

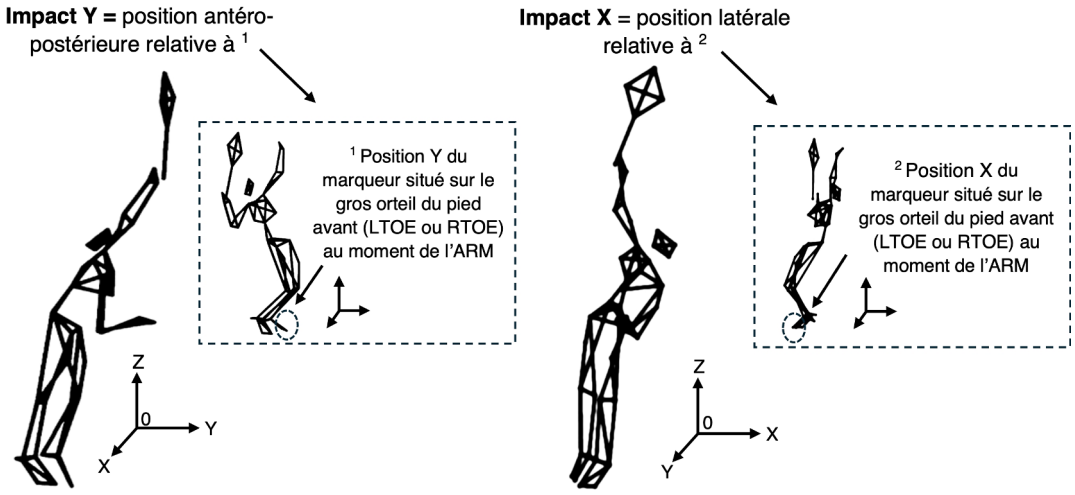


FIGURE 6.9 – Méthode de calcul des positions d'impact antéro-postérieure et latérale. Impact Y : position antéro-postérieure du point d'impact balle–raquette ; Impact X : position latérale de l'impact balle–raquette ; LTOE : tête du gros orteil gauche ; RTOE : tête du gros orteil droit ; ARM : position d'armée.

6.2.2.4 Clustering

Un modèle de mélange gaussien (Gaussian Mixture Model) a été retenu pour identifier les différentes stratégies motrices utilisées par des joueurs à partir de données cinématiques discrètes. Ce modèle a déjà montré son intérêt en biomécanique. Il a, par exemple, été appliqué dans un contexte clinique sur des paramètres spatio-temporels de la marche (Dolatabadi et al., 2017), et dans un contexte de performance pour identifier des stratégies

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

motrices à partir de données biomécaniques obtenues en course à pied et en squats (Forrester & Townend, 2015 ; Remedios et al., 2020). Contrairement aux approches géométriques, comme le k-means, qui reposent uniquement sur des distances euclidiennes et supposent des clusters sphériques, le modèle de mélange gaussien offre une plus grande flexibilité, puisqu'il permet de modéliser des clusters elliptiques de tailles différentes, sans hypothèse préalable sur leur nombre ni sur leur structure (Gormley et al., 2023). Le modèle suppose que les données $\mathbf{x}_1, \ldots, \mathbf{x}_n \in R^d$ proviennent d'un mélange fini de K composantes gaussiennes, où chaque composante correspond à une classe latente (Fraley, 1998 ; McNicholas, 2016). Dans notre cas, chaque individu $i = 1, \ldots, n$ correspond à un joueur, et les données $\mathbf{x}_i$ sont les vecteurs décrivant les paramètres cinématiques du service. Pour une observation $\mathbf{x}_i$, la probabilité estimée a posteriori d'appartenir au cluster k est donnée par :

$$\tau_{ik} = \hat{P}\left(z_i = k \mid \mathbf{x}_i, \hat{\theta}\right) \tag{6.1}$$

où :

— $z_i \in \{1, \ldots, K\}$ est la variable latente indiquant le cluster du joueur i ayant les caractéristiques $\mathbf{x}_i$

— $\hat{\theta}$ représente les estimations des paramètres des lois gaussiennes, obtenues par maximum de vraisemblance via l'algorithme EM (Expectation–Maximization)

Une classification peut être obtenue en assignant le joueur i au cluster dont la probabilité estimée a posteriori τ_{ik} est maximale :

$$\hat{z}_i = \arg \max_{k=1,\ldots,K} \tau_{ik} \tag{6.2}$$

Le degré d'incertitude de l'affectation du joueur i est défini par :

$$u_i = 1 - \max_{k=1,\ldots,K} \tau_{ik} \tag{6.3}$$

— Si $\max_{k=1,\ldots,K} \tau_{ik} \approx 1$, alors $u_i \approx 0$, ce qui traduit une classification très sûre

— Si $\max_{k=1,\ldots,K} \tau_{ik}$ est faible, alors u_i est élevé, ce qui reflète une forte incertitude

L'analyse a été réalisée sous R avec le package Mclust (Fraley, 1998), qui implémente cette méthode dans un cadre bayésien et utilise le critère d'information bayésien (BIC) pour sélectionner automatiquement le modèle le plus adapté. Les données fournies à l'algorithme ont été préalablement standardisées afin que chaque variable ait une moyenne nulle

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

et un écart type égal à 1 (Milligan & Cooper, 1988). Ces données discrètes comprennent 10 variables cinématiques qui sont présentées dans le Tableau 6.5.

Variable discrète	**Description**
$\theta^{\max}$ Épaules (°)	– Angle maximal des épaules par rapport à la ligne de fond de court
$\theta^{\max}$ Hanches (°)	– Angle maximal des hanches par rapport à la ligne de fond de court
$\theta^{\max}$ Séparation (°)	– Angle de séparation maximal
$\omega_{\max}$ Pelvis ($° \cdot s^{-1}$)	– Vitesse maximale de rotation longitudinale du pelvis
$\omega_{\max}$ Thorax ($° \cdot s^{-1}$)	– Vitesse maximale de rotation longitudinale du thorax
$t\ \theta^{\max}$ Épaules (%)	– Timing d'apparition de l'angle maximal des épaules
$t\ \theta^{\max}$ Hanches (%)	– Timing d'apparition de l'angle maximal des hanches
$t\ \theta^{\max}$ Séparation (%)	– Timing d'apparition de l'angle de séparation maximal
$t\ \omega^{\max}$ Pelvis (%)	– Timing d'apparition de la vitesse maximale de rotation longitudinale du pelvis
$t\ \omega^{\max}$ Thorax (%)	– Timing d'apparition de la vitesse maximale de rotation longitudinale du Thorax

TABLE 6.5 – Variables discrètes utilisées comme données d'entrée pour l'algorithme de clustering. θ : angle ; ω : vitesse de rotation longitudinale ; t : timing d'apparition.

6.2.2.5 Analyses statistiques

Les moyennes et écarts-types ont été calculés pour l'ensemble des variables. La normalité des distributions a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro-Wilk. L'homogénéité des variances a été vérifiée avec le test de Levene. Des analyses de variance à un facteur (ANOVA) ont été effectuées pour comparer les données suivantes entre les clusters : paramètres anthropométriques, vitesse de balle, positions d'impact balle–raquette, variables cinématiques liées à la rotation longitudinale du tronc. Les valeurs de p des effets principaux ont été ajustées selon la méthode de Benjamini–Hochberg pour contrôler le risque d'erreur de type 1. En cas d'effet principal significatif, des comparaisons post-hoc ont été réalisées pour les ANOVA à l'aide du test Tukey. Lorsque les conditions préalables pour une ANOVA (normalité des résidus et homogénéité des variances) n'étaient pas respectées, un test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été appliqué, suivi de comparaisons post-hoc avec le test de Dunn. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel RStudio (version 2024.04.1, R Foundation for Statistical Computing, Vienne, Autriche). Le seuil de significativité a été fixé à $p = 0{,}05$.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

6.2.3 Résultats

6.2.3.1 Clustering

Le critère de sélection du modèle, basé sur le BIC, a retenu une solution comprenant 3 clusters. Le modèle choisi est le modèle VVI (diagonal, volume et forme variables). La répartition des joueurs dans les clusters est la suivante : 20 joueurs dans le cluster 1, 32 dans le cluster 2 et 15 dans le cluster 3. La Figure 6.10 présente les valeurs des joueurs pour les différents paramètres cinématiques avec des tailles de points proportionnelles à l'incertitude d'appartenance à l'un des clusters. Le Tableau 6.6 montre les probabilités d'appartenance aux clusters pour les 6 joueurs présentant la plus grande incertitude (incertitude $> 0{,}05$). La majorité des 61 autres joueurs présentent une incertitude proche de zéro. Nous pouvons constater que les joueurs présentant les plus fortes incertitudes sont néanmoins bien classés avec de fortes probabilités d'appartenance a posteriori à un seul cluster. Nous n'avons donc pas de joueurs « à cheval » entre deux clusters.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

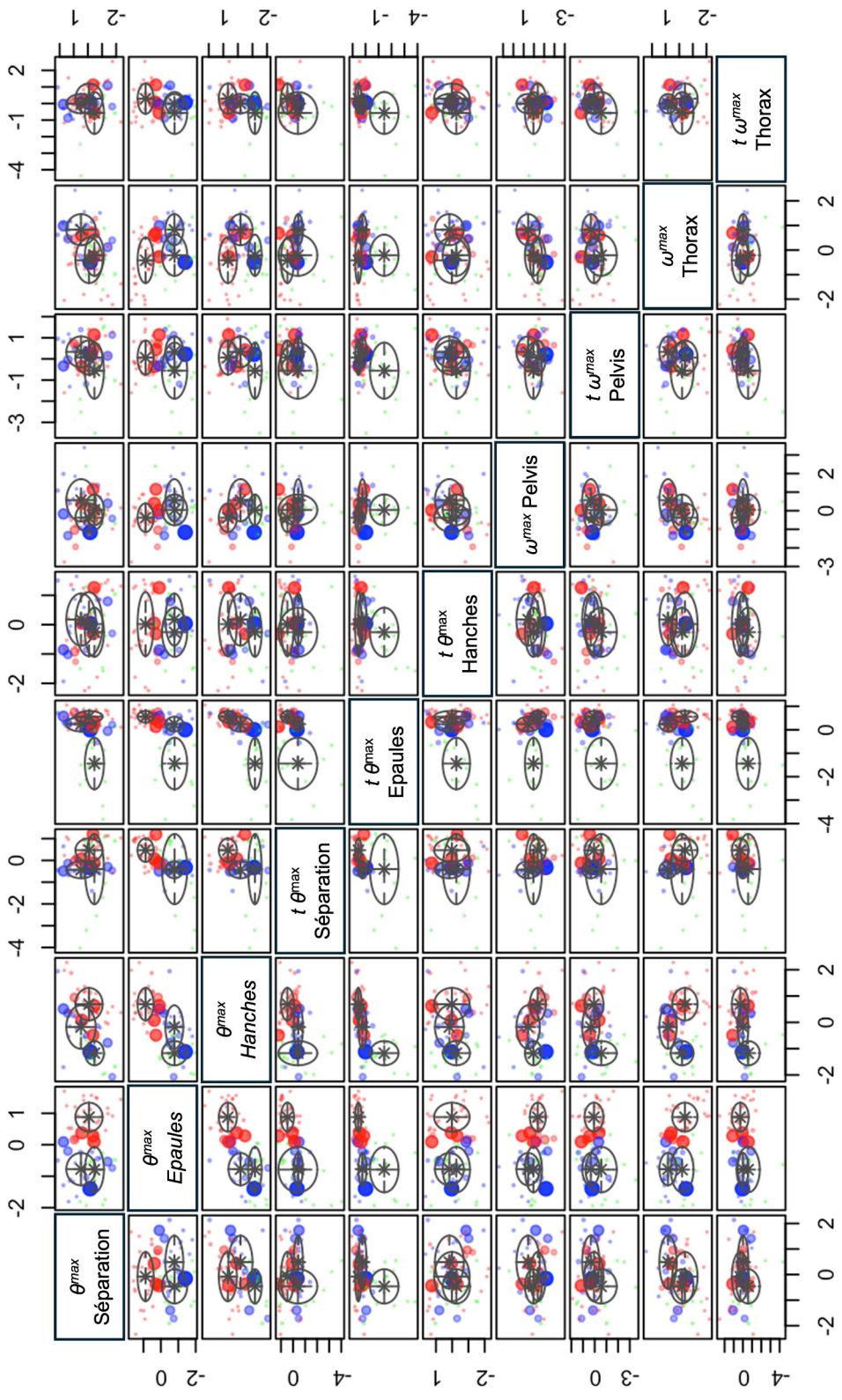


FIGURE 6.10 – Représentation du degré d'incertitude d'appartenance à un des clusters par joueur selon les différents paramètres cinématiques du service

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

N° du joueur	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Incertitude
1	0,74	0,00	0,26	0,26
45	0,18	0,82	0,00	0,18
29	0,17	0,83	0,00	0,17
56	0,00	0,84	0,16	0,16
30	0,89	0,11	0,00	0,11
10	0,92	0,00	0,08	0,08

TABLE 6.6 – Probabilités d'appartenance aux clusters pour les 6 joueurs présentant les plus grandes incertitudes

6.2.3.2 Paramètres anthropométriques, vitesse de balle et positions d'impact

Aucune différence significative n'a été observée entre les 3 clusters en ce qui concerne les caractéristiques anthropométriques, la vitesse de balle et les positions d'impact balle–raquette (Tableau 6.7). Le test de χ^2 ne montre aucune différence significative dans la répartition des techniques d'appuis entre les clusters ($p = 0{,}464$).

	Cluster 1 ($n = 20$)	**Cluster 2 ($n = 32$)**	**Cluster 3 ($n = 15$)**	**ANOVA / Kruskal-Wallis**
	Moyenne ± ET	**Moyenne ± ET**	**Moyenne ± ET**	***p* ajusté (B-H)**
Taille (m)	1,85 ± 0,08	1,87 ± 0,07	1,88 ± 0,06	0,689
Masse corporelle (kg)	77,1 ± 8,7	77,8 ± 7,6	77,8 ± 7,5	0,967
Age (ans)	19,3 ± 3,5	20,9 ± 3,4	21,6 ± 5,0	0,252
Vitesse de balle ($km \cdot h^{-1}$)	183,7 ± 10,1	182,1 ± 11,0	181,8 ± 9,6	0,892
Impact X (m)	$-0,07 \pm 0,20$	$-0,13 \pm 0,17$	$-0,14 \pm 0,24$	0,592
Impact Z (% de la taille)	148,8 ± 2,5	147,5 ± 3,9	147,3 ± 3,3	0,437
Impact Y (% de la taille)	29,7 ± 8,1	33,9 ± 6,2	30,3 ± 5,5	0,099
Joueurs avec relais d'appuis (%)	85	87,5	73,5	/
Joueurs avec appuis écartés (%)	15	12,5	26,5	/

TABLE 6.7 – Comparaison des paramètres anthropométriques, de la vitesse de balle, des positions d'impact (latérale, antéro-postérieure et verticale) et de la répartition selon la technique d'appuis utilisée (relais d'appuis/appuis écartés) entre les 3 clusters. ET : écart-type ; p ajusté (BH) : valeur de p corrigée selon la méthode de Benjamini–Hochberg ; Impact X : position latérale de l'impact ; Impact Y : position antéro-postérieure de l'impact ; Impact Z : position verticale de l'impact.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

6.2.3.3 Paramètres angulaires liés à la rotation longitudinale du tronc

Le Tableau 6.8 présente les valeurs des angles des épaules, des hanches et de l'angle de séparation pour chaque cluster aux différents instants d'intérêt. La Figure 6.11 illustre l'évolution de ces angles au cours du service entre LB et IMP.

Le cluster 1 possède les angles de séparation les plus élevés. Sa valeur maximale est significativement supérieure à celle du cluster 1 et sa valeur à l'ARM est significativement plus élevée que pour les 2 autres clusters. Il présente les vitesses maximales de rotation longitudinale du tronc et du pelvis les plus importantes. Sa vitesse maximale de rotation longitudinale du pelvis est significativement plus grande que celle du cluster 2 et sa vitesse maximale de rotation longitudinale du thorax dépasse significativement celles des 2 autres clusters.

Le cluster 2 présente la rotation des épaules la plus faible. Sa valeur maximale est significativement inférieure à celle des 2 autres clusters, ainsi qu'aux moments d'ARM et de PLBR. Au moment du LB, la rotation des épaules du cluster 2 est également significativement plus faible que celle du cluster 3. Ce cluster possède aussi la rotation maximale des hanches la plus faible.

Le cluster 3 présente les angles de rotation longitudinale des hanches les plus élevés. Sa valeur maximale est significativement supérieure à celle des 2 autres clusters, ainsi qu'aux instants de LB et d'ARM. Il montre également une rotation des hanches significativement supérieure à celle du cluster 2 au moment de PLBR. Il possède les angles de séparation les plus faibles.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	ANOVA / K-W	Post-Hoc		
	Moyenne ± ET	**Moyenne ± ET**	**Moyenne ± ET**	***p* ajusté (B–H)**	**clus 1 *vs.* clus 2**	**clus 1 *vs.* clus 3**	**clus 2 *vs.* clus 3**
θ Séparation							
$\theta^{\max}$ Séparation (°)	$32{,}7 \pm 10{,}6$	$27{,}1 \pm 9{,}5$	$23{,}4 \pm 6{,}9$	0,031		*	
θ^{LB} Séparation (°)	$-6{,}7 \pm 8{,}3$	$-7{,}3 \pm 8{,}9$	$-0{,}05 \pm 10{,}8$	0,063			
θ^{ARM} Séparation (°)	$24{,}5 \pm 9{,}8$	$12{,}9 \pm 11{,}7$	$11{,}6 \pm 10{,}8$	0,001	**	**	
θ^{PLBR} Séparation (°)	$22{,}4 \pm 11{,}1$	$22{,}4 \pm 10{,}0$	$15{,}6 \pm 9{,}1$	0,115			
θ^{IMP} Séparation (°)	$-10{,}5 \pm 9{,}0$	$-9{,}2 \pm 8{,}8$	$-13{,}1 \pm 9{,}8$	0,585			
θ Épaules							
$\theta^{\max}$ Épaules (°)	$-120{,}9 \pm 7{,}8$	$-95{,}6 \pm 7{,}1$	$-120{,}8 \pm 11{,}3$	$< 0{,}001$	***		***
θ^{LB} Épaules (°)	$-75{,}9 \pm 18{,}1$	$-67{,}0 \pm 15{,}2$	$-101{,}3 \pm 16{,}1$	$< 0{,}001$		***	***
θ^{ARM} Épaules (°)	$-114{,}8 \pm 11{,}6$	$-91{,}9 \pm 10{,}5$	$-110{,}1 \pm 10{,}9$	$< 0{,}001$	***		***
θ^{PLBR} Épaules (°)	$-72{,}3 \pm 7{,}6$	$-64{,}9 \pm 6{,}5$	$-72{,}1 \pm 7{,}7$	0,001	**		**
θ^{IMP} Épaules (°)	$2{,}1 \pm 15{,}4$	$1{,}6 \pm 12{,}6$	$-4{,}0 \pm 12{,}8$	0,423			
θ Hanches							
$\theta^{\max}$ Hanches (°)	$-98{,}6 \pm 12{,}3$	$-85{,}7 \pm 9{,}2$	$-112{,}7 \pm 6{,}9$	$< 0{,}001$	***	***	***
θ^{LB} Hanches (°)	$-82{,}6 \pm 16{,}3$	$-74{,}3 \pm 11{,}9$	$-101{,}3 \pm 8{,}7$	$< 0{,}001$		***	***
θ^{ARM} Hanches (°)	$-90{,}1 \pm 11{,}3$	$-79{,}0 \pm 10{,}3$	$-98{,}5 \pm 12{,}8$	$< 0{,}001$		**	***
θ^{PLBR} Hanches (°)	$-49{,}9 \pm 12{,}1$	$-42{,}5 \pm 10{,}9$	$-56{,}5 \pm 13{,}8$	0,003			**
θ^{IMP} Hanches (°)	$-8{,}4 \pm 14{,}6$	$-7{,}6 \pm 10{,}2$	$-17{,}1 \pm 9{,}9$	0,055			
ω Pelvis et Tronc							
$\omega^{\max}$ Pelvis ($^\circ \cdot s^{-1}$)	$537{,}7 \pm 85{,}2$	$472{,}2 \pm 57{,}1$	$502{,}4 \pm 61{,}3$	0,011	**		
$\omega^{\max}$ Thorax ($^\circ \cdot s^{-1}$)	$697{,}3 \pm 52{,}9$	$598{,}4 \pm 75{,}7$	$613{,}4 \pm 70{,}5$	$< 0{,}001$	***	**	

TABLE 6.8 – Comparaison des paramètres angulaires de rotation longitudinale du tronc entre les clusters 1, 2 et 3. * $p < 0{,}05$; ** $p < 0{,}01$; *** $p < 0{,}001$; clust : cluster ; ET : écart type, K-W : Kruskal-Wallis ; p ajusté (B-H) : valeur de p corrigée selon la méthode de Benjamini–Hochberg ; θ : angle ; $\omega^{\max}$: vitesse maximale de rotation longitudinale ; ^{LB} : lancer de balle, ^{ARM} ; position armée ; ^{PLBR} : point le plus bas de la raquette ; ^{IMP} : impact.

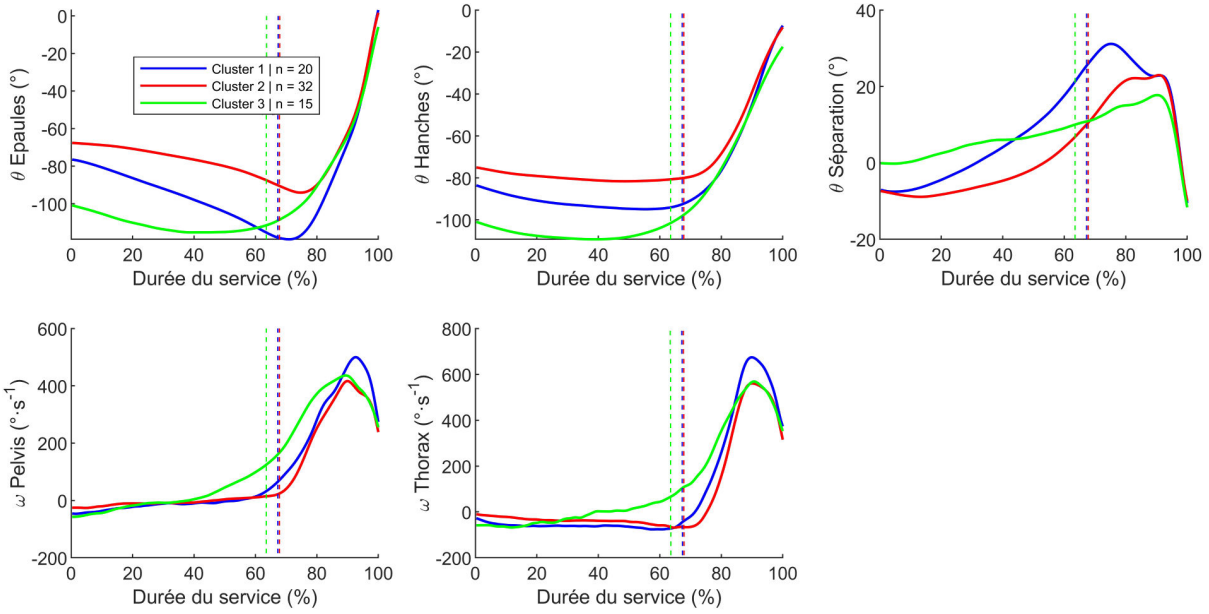


FIGURE 6.11 – Évolution des angles des épaules, des hanches et de séparation et des vitesses de rotation longitudinale du pelvis et du thorax au cours du service pour les 3 clusters. Le temps est exprimé en pourcentage de la durée du service allant du lancer de balle (LB) jusqu'à l'impact (IMP). Les traits en pointillé indiquent l'instant où chaque cluster atteint l'ARM.

6.2.3.4 Paramètres temporels liés à la rotation longitudinale du tronc

Le Tableau 6.9 présente les paramètres temporels liés à la rotation longitudinale du tronc. Le cluster 2 atteint l'angle de séparation maximal significativement plus tard que les 2 autres clusters. Le cluster 3 présente une rotation maximale des épaules significativement plus précoce que les deux autres clusters. C'est pour le cluster 3 que le délai entre les rotations maximales des épaules et des hanches est le plus bref, témoignant d'un fonctionnement « en bloc ». Ce cluster atteint aussi sa vitesse maximale de rotation du pelvis significativement plus tôt que le cluster 1.

	Cluster 1	**Cluster 2**	**Cluster 3**	**ANOVA / K-W**	**Post-Hoc**		
	Moyenne ± ET	**Moyenne ± ET**	**Moyenne ± ET**	***p* ajusté (B–H)**	**clus 1 *vs.* clus 2**	**clus 1 *vs.* clus 3**	**clus 2 *vs.* clus 3**
t $\theta^{\max}$ Séparation (%)	76,4 ± 4,3	86,6 ± 6,1	76,6 ± 18,9	< 0,001	**		**
t $\theta^{\max}$ Épaules (%)	69,6 ± 4,6	74,2 ± 3,6	45,1 ± 15,9	< 0,001		***	***
t $\theta^{\max}$ Hanches (%)	47,7 ± 17,8	45,3 ± 21,7	39,3 ± 17,2	0,491			
Δ t $\theta^{\max}$ Hanches–Épaules (%)	21,9 ± 18,3	29,1 ± 21,7	5,8 ± 9,4	0,002		*	***
t $\omega^{\max}$ Pelvis (%)	92,4 ± 3,1	91,4 ± 3,4	88,6 ± 5,8	0,042		*	
t $\omega^{\max}$ Thorax (%)	90,3 ± 2,0	91,3 ± 3,1	88,3 ± 4,4	0,061			
Δ t $\omega^{\max}$ thorax–Pelvis (%)	$-2{,}1 \pm 3{,}6$	$-0{,}1 \pm 3{,}3$	$-0{,}3 \pm 4{,}7$	0,232			

TABLE 6.9 – Comparaison des paramètres temporels de rotation longitudinale du tronc entre les clusters 1, 2 et 3. * $p < 0{,}05$; ** $p < 0{,}01$; *** $p < 0{,}001$; clust : cluster ; ET : écart type, K-W : Kruskal-Wallis ; p ajusté (B-H) : valeur de p corrigée selon la méthode de Benjamini–Hochberg ; θ : angle ; $\omega^{\max}$: vitesse maximale de rotation longitudinale ; Δ t : différence de timing d'apparition.

6.2.4 Discussion

L'objectif principal de cette étude était d'identifier, à l'aide d'une analyse de clustering, les différentes stratégies de coordination mises en œuvre par les joueurs de tennis experts concernant la cinématique longitudinale du tronc. Trois clusters ont été identifiés, présentant des caractéristiques anthropométriques et un niveau de performance identiques en termes de vitesse de balle et de positions d'impact. Ces clusters se distinguent toutefois de manière significative quant à la manière de tourner le tronc autour de l'axe longitudinal.

Nos résultats montrent des vitesses de balle et des positions d'impact similaires entre les clusters, avec des valeurs conformes à celles rapportées chez des joueurs de tennis professionnels dans d'autres études (J. Chow et al., 2003 ; Whiteside et al., 2013b). Le cluster 1 regroupe les joueurs présentant une dissociation marquée entre les hanches et les épaules, caractérisée par un angle de séparation maximal d'environ $33 \pm 11°$ et un angle de séparation d'environ $24 \pm 10°$ à l'ARM. À cet instant, les épaules sont très engagées dans l'action de « vissage » ($-115 \pm 12°$), tandis que la rotation des hanches reste modérée ($-90 \pm 11°$). Ce cluster se distingue également par les vitesses maximales de rotation longitudinale du pelvis ($538 \pm 85° \cdot s^{-1}$) et du thorax ($697 \pm 53° \cdot s^{-1}$) les plus élevées. Ce cluster pourrait être qualifié de « *high shoulder rotation, high separation, high rotational speeds* ». La dissociation observée à l'ARM pour ce cluster est supérieure d'environ 10° à celle rapportée par Tubez et al. (2021) chez des joueurs de tennis adultes ($15 \pm 10°$). Ce cluster semble cohérent avec le principe biomécanique bien établi de mise en tension des muscles obliques, décrit dans de nombreux gestes sportifs, comme le pitch au baseball, le smash au badminton, ou encore le swing au golf (Bullock et al., 2020 ; Chu et al., 2009 ; Fleisig et al., 2013 ; J. Myers et al., 2008 ; Young et al., 1998 ; Zhang et al., 2016 ; Zheng et al., 2008). L'ensemble de ces travaux soutient l'idée que la dissociation longitudinale entre les lignes des épaules et des hanches permet de stocker de l'énergie élastique, ensuite restituée lors du mouvement de « dévissage ». Ce mécanisme contribue à l'augmentation de la vitesse de rotation du pelvis et du thorax, et par conséquent à celle de la balle lors du pitch, du smash ou du swing de golf. Cette stratégie est observée chez certains joueurs de notre échantillon ($n = 20$). Toutefois, elle doit être envisagée avec prudence sur le plan pédagogique car elle ne semble pas adaptée à tous les joueurs, en particulier à ceux appartenant aux clusters 2 et 3.

À l'inverse, le cluster 3 se distingue par une rotation maximale importante des hanches ($-113 \pm 7°$) et des épaules ($-121 \pm 11°$) associées à une faible dissociation. L'angle de séparation maximal est réduit ($23 \pm 7°$) et reste faible au moment de l'ARM ($12 \pm 11°$).

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

De plus, la rotation maximale des épaules est atteinte très tôt (45 % de la durée du service) et survient relativement proche du moment de rotation maximale des hanches (39 % de la durée du service) avec seulement 6 % de différence sur le plan temporel. Ce cluster se caractérise par une stratégie de coordination que l'on pourrait qualifier d'« associée » ou « en bloc », où les hanches et les épaules tournent ensemble, sans créer de forte dissociation, malgré des amplitudes de rotation importantes. Nous pouvons le qualifier de « *high shoulder and hip rotations, low separation* ». Les rotations maximales mesurées pour ce cluster dépassent respectivement de 14° pour les hanches et de 28° pour les épaules, les valeurs rapportées par Wagner et al. (2014) chez 10 joueurs de tennis experts (hanches : $-99 \pm 17°$; épaules : $-102 \pm 18°$). Cette stratégie contraste nettement avec celle du cluster 1 et s'écarte du modèle largement mis en avant dans la littérature, qui préconise une importante dissociation entre les hanches et les épaules pour optimiser la vitesse de balle. Il suggère qu'un haut niveau de performance peut être atteint sans nécessairement augmenter l'angle de séparation et confirme les résultats de l'étude précédente montrant l'absence de corrélation directe entre l'angle de séparation et la vitesse de balle. Il reste à déterminer si cette stratégie résulte d'un effet d'apprentissage, d'un choix préférentiel, dès le plus jeune âge, ou si elle répond plutôt à des contraintes morphologiques et structurelles. Cette question ouvre des perspectives intéressantes pour l'étude suivante.

Le cluster 2, le plus représenté dans notre échantillon, se caractérise par les rotations maximales les plus faibles au niveau des épaules ($-96 \pm 7°$) et des hanches ($-86 \pm 9°$) et un angle de séparation limité, similaire à celui du cluster 3 au moment de l'ARM (13 $\pm$ 12°). Contrairement aux clusters 1 et 3, l'angle de séparation maximal se situe à une valeur intermédiaire (27 $\pm$ 9°), mais il est atteint significativement plus tard (environ 87 % de la durée du service), en raison d'une rotation maximale des épaules survenant plus tard dans le geste. Ce cluster semble ainsi occuper une position intermédiaire entre les clusters 1 et 3. D'après la Figure 6.11, il semble principalement fonctionner de façon « associée » sur la première partie du geste (jusqu'à environ 45 % de la durée du service), puis montre une dissociation tardive au cours de la seconde partie du mouvement (à partir d'environ 45 % de la durée du service). Nous pouvons lui attribuer les caractéristiques suivantes : « *low shoulder and hip rotations, late and medium separation* ».

D'un point de vue des applications pratiques, ces résultats confirment qu'il n'existe pas un seul profil de coordination motrice utilisé par tous les joueurs. Au contraire, cette étude souligne la diversité des stratégies quant à la rotation longitudinale du tronc pour obtenir une performance identique. Cette variabilité devrait être prise en compte par les

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

entraîneurs dans l'entraînement technique et éventuellement la préparation physique des joueurs experts. Une démarche pragmatique pourrait consister, dans un premier temps, à essayer de quantifier le degré de dissociation au moment de l'ARM, qui est un instant-clé facilement identifiable par les entraîneurs pour distinguer les stratégies. Un angle de séparation marqué à cet instant pourrait suggérer une stratégie du type « *high shoulder rotation, high separation, high rotational speeds* » (cluster 1). En revanche, si la dissociation paraît faible à cet instant, l'entraîneur peut rechercher d'autres indices au début du geste pour évaluer la dynamique de la rotation des épaules et des hanches lors du « vissage », tout en se concentrant sur certains indices tels que la position des pieds, la trajectoire de la main libre qui effectue le lancer de balle ou encore l'orientation de la tête. Une rotation ample des hanches et des épaules orienterait plutôt vers une stratégie « *high shoulder and hip rotations, low separation* » (cluster 3). À l'inverse une rotation plus faible, associée à une dissociation tardive, correspondrait davantage à une stratégie de type « *low shoulder and hip rotations, late and medium separation* » (cluster 2). Toutefois, la variabilité inter-individuelle rappelle qu'au-delà des stratégies identifiées, il existe toujours des exceptions et une « signature motrice » propre à chaque joueur (Figure 6.10). Ces stratégies doivent donc être considérées comme des repères situés sur un continuum, plutôt que comme des cases dans lesquelles il faudrait classer les joueurs. Leur intérêt réside avant tout dans la compréhension des mécanismes sous-jacents et des variables biomécaniques qui s'articulent entre elles pour façonner une stratégie donnée. Dans cette optique, une alternative intéressante consisterait à accompagner un joueur donné dans l'exploration de ces différentes stratégies pour qu'il identifie celle où il se sent le mieux, tout en s'appuyant sur une évaluation comparative de la performance entre les stratégies testées.

Les contenus d'entraînement pourraient également être ajustés en fonction des exigences propres à chaque stratégie. Par exemple :

— Pour un joueur du cluster 1 caractérisé par « *high shoulder rotation, high separation, high rotational speeds* », l'accent peut être mis sur le développement d'une forte dissociation entre les hanches et les épaules, permettant une mise en tension des muscles obliques et une restitution de l'énergie élastique. Les exercices recommandés pour ce cluster peuvent cibler le « dévissage » rapide afin d'optimiser le développement des vitesses de rotation longitudinales au niveau du pelvis et du thorax.

— Pour une stratégie de type « *high shoulder and hip rotations, low separation* »

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

(cluster 3), il serait recommandé de privilégier des rotations amples et précoces, réalisées de manière associée entre les hanches et les épaules. Les exercices et les consignes proposés aux joueurs devraient favoriser cette coordination en conseillant, par exemple, une position de départ avec le buste davantage « vissé », les pieds orientés sur le côté, une montée du bras de lancer parallèle à la ligne de fond de court et une rotation longitudinale des épaules et des hanches vers l'arrière synchronisée et « en bloc ».

— Pour une stratégie intermédiaire de type « *low shoulder and hip rotations, late and medium separation* » (cluster 2), il peut être intéressant de limiter l'amplitude des rotations des hanches et des épaules durant la phase de préparation, en adoptant une position de départ et une montée du bras de lancer plus frontale. La dissociation entre les hanches et les épaules pourra alors apparaître plus tardivement, principalement au cours de la phase de propulsion après l'ARM.

En termes de perspectives, il serait pertinent d'examiner dans quelle mesure la trajectoire du bras libre durant le lancer de balle influence l'organisation des rotations du tronc lors des phases de préparation et de propulsion. En effet, les entraîneurs se demandent souvent si « le bras libre doit partir sur le côté ou devant » pour lancer la balle, et se questionnent sur les effets potentiels de ce choix sur les mouvements du tronc (Fetisova et al., 2021 ; Genevois, 2016). Des premiers travaux menés par Newton et al. (2025) ont mis en évidence que le timing de l'adduction (descente) du bras libre après le lancer de balle influence la cinématique du tronc au cours du service, démontrant un lien entre les mouvements du bras libre et du tronc. Il convient désormais d'aller plus loin en déterminant si la montée du bras libre pour lancer la balle conditionne réellement la stratégie de coordination adoptée par le joueur. Cette hypothèse reste à vérifier mais elle ouvre une piste de recherche intéressante pour de futures études. Par ailleurs, il serait intéressant d'élargir ce type d'investigations à d'autres catégories de joueurs de tennis (femmes, juniors, débutants, joueurs de niveau intermédiaire) afin de savoir si les trois clusters identifiés dans ce travail sont spécifiques ou non aux joueurs de tennis masculins experts ou s'ils se retrouvent également dans d'autres populations tennistiques. En effet, des études antérieures en natation et en équitation ont montré que les stratégies de coordination peuvent différer entre novices et experts (Seifert et al., 2011 ; Trabelsi et al., 2022) et entre hommes et femmes (Bideault et al., 2013). Il serait aussi intéressant d'examiner si des facteurs tels que le stress ou la fatigue modifient les stratégies de coordination au cours d'un match. En natation, Gonjo et al. (2023) ont identifié trois stratégies de coordination différentes

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

lors du 200 m brasse, et ont observé que certains nageurs modifiaient leur pattern en cours de course, notamment en réduisant la durée de glisse en réponse à la fatigue accumulée.

Une première limite de cette étude concerne le choix des variables d'entrée utilisées pour le clustering qui sont susceptibles d'influencer les résultats. Nous avons sélectionné des variables discrètes comprenant des valeurs maximales d'angles et de vitesses angulaires qui sont les plus fréquemment employées dans la littérature en biomécanique du service et qui restent facilement interprétables et exploitables par les entraîneurs sur le terrain. Bien que certains indicateurs temporels aient été inclus, cette méthode ne permet pas de capturer de manière fine l'évolution continue du mouvement tout au long du service. En effet, les variables discrètes ne reflètent pas la nature continue des données biomécaniques, en particulier leurs aspects temporels, et peuvent donc négliger des détails importants (Ramsay & Silverman, 2005). Il convient de rappeler que les clusters identifiés dépendent de la population étudiée et de la méthode de clustering, et que d'autres algorithmes auraient pu aboutir à des clusters contenant des stratégies motrices différentes. Nous avons choisi une approche probabiliste basée sur l'algorithme Mclust, qui est flexible, ne nécessite pas de nombre de clusters prédéfini et permet une sélection de modèle rigoureuse avec le critère BIC. En revanche, cette méthode suppose que les données suivent une distribution normale et peut être sensible aux valeurs extrêmes. Une autre limite de cette étude concerne la taille de l'échantillon. Avec 67 joueurs, l'échantillon est relativement important pour une étude incluant des joueurs experts, mais comparé à celui de certains travaux de clustering en biomécanique du sport dépassant les 100 participants (Floría et al., 2024 ; Senevirathna et al., 2023 ; Taylor et al., 2025), il peut être considéré comme limité.

6.2.5 Conclusion

Les résultats de cette étude ont permis d'identifier 3 stratégies motrices concernant les rotations longitudinales du tronc lors du service chez des joueurs de tennis experts. Aucun des profils de coordination observés n'est associé à une vitesse de balle ou à une hauteur d'impact supérieures. Ces clusters ne sont pas influencés par les paramètres anthropométriques tels que la taille et la masse corporelle ni par l'âge ou encore la technique d'appuis utilisée. Ces investigations ont permis de mieux comprendre les caractéristiques propres à chaque profil quant à la cinématique longitudinale du tronc. Elles renforcent l'idée que l'entraînement du service doit reposer sur le principe d'individualisation, plutôt que sur un modèle « unique ». Reste à comprendre pourquoi certains joueurs adoptent une

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

stratégie plutôt qu'une autre : est-ce lié à des contraintes anatomiques ou structurelles ? Cette interrogation constituera le point de départ de l'étude 5.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

6.3 Étude 5 : Les capacités de dissociation et les amplitudes maximales de rotation du tronc mesurées au cours de tests cliniques et fonctionnels influencent-elles la cinématique du service des joueurs de tennis experts ?

6.3.1 Introduction

Les études précédentes de cette thèse ont mis en évidence plusieurs résultats intéressants. Premièrement, il existe une variabilité inter-individuelle au niveau de la cinématique longitudinale du tronc au service chez les joueurs de tennis experts. Cette variabilité concerne les angles des épaules et des hanches par rapport à la ligne de fond de court, l'angle de séparation, ainsi que les vitesses maximales de rotation longitudinale du thorax et du pelvis et leur timing d'apparition. Deuxièmement, ces variables ne sont pas significativement corrélées à la vitesse de balle. Enfin, les joueurs experts de notre échantillon utilisent trois stratégies motrices distinctes concernant les rotations du tronc autour de l'axe longitudinal. La 1re stratégie se caractérise par de fortes amplitudes de rotation des épaules, un angle de séparation élevé et des vitesses de rotation importantes (« *high shoulder rotation, high separation, high rotational speeds* »). La 2e présente des amplitudes plus faibles au niveau des épaules et des hanches, associées à une séparation tardive et modérée (« *low shoulder and hip rotations, late and medium separation* »). Enfin, la 3e stratégie combine de fortes amplitudes de rotation des épaules et des hanches avec un angle de séparation plus faible (« *high shoulder and hip rotations, low separation* »). Aucune de ces stratégies de coordination n'est associée à une vitesse de balle ou à une hauteur d'impact significativement supérieures.

Ces stratégies peuvent être analysées à la lumière de la théorie dynamique du contrôle moteur, selon laquelle le comportement moteur émerge de l'interaction entre différentes contraintes liées à l'organisme, à la tâche et à l'environnement (Newell, 1986). Une contrainte peut être définie comme tout facteur susceptible de limiter les degrés de liberté du système, c'est-à-dire ses possibilités d'action. L'étude précédente a démontré que les stratégies de coordination mises en évidence au service chez les joueurs de tennis experts ne sont pas déterminées par les contraintes suivantes : paramètres anthropométriques (taille, masse corporelle), âge, positions d'impact et technique d'appuis utilisée. Afin de mieux com-

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

prendre l'émergence de ces stratégies de coordination, il s'avère désormais pertinent de s'intéresser à d'autres contraintes « organismiques » structurelles telles que l'amplitude de rotation du tronc ou encore la capacité de dissociation entre les hanches et les épaules. En effet, il est, par exemple plausible que les joueurs les plus « souples » ou les plus « naturellement dissociés » autour de l'axe longitudinal soient ceux qui atteignent les angles de séparation les plus élevés au service.

Dans la littérature, les recherches consacrées à l'évaluation de la mobilité rotationnelle du tronc et de la capacité de dissociation hanches/épaules des joueurs de tennis sont limitées (Campbell et al., 2013 ; Palmer et al., 2018). Palmer et al. (2018) n'ont obtenu aucune corrélation significative entre l'amplitude maximale de rotation longitudinale du tronc mesurée à l'aide du Seated Trunk Rotation Test (STRT) et la vitesse du service chez 42 joueurs de tennis experts. De leur côté, Campbell et al. (2013) ont évalué la mobilité lombaire mesurée à partir de tests cliniques et la cinématique du tronc au service chez des joueurs juniors avec et sans douleur au dos, dans un souci de prévention des blessures. Leurs résultats indiquent que les joueurs approchaient leurs amplitudes maximales de rotation du haut et du bas du tronc au cours des phases de préparation et d'accélération du service, suggérant ainsi que les amplitudes maximales de rotation du tronc mesurées lors de tests fonctionnels pourraient être corrélées à celles observées lors du service. Néanmoins, aucune étude n'a examiné spécifiquement l'influence des capacités de rotation du tronc sur la cinématique du service au tennis.

Le rôle fondamental du tronc dans le transfert d'énergie et de moment cinétique au service (Bahamonde, 2000) a davantage orienté les travaux de recherche vers le développement de tests d'évaluation permettant de mesurer la puissance et la force des muscles rotateurs du tronc (Ellenbecker & Roetert, 2004 ; Fernandez-Fernandez et al., 2014 ; Genevois et al., 2013 ; Ikeda et al., 2006, 2009 ; Kovacs & Ellenbecker, 2011a ; Roetert et al., 1996 ; Sánchez-Pay et al., 2021). Dans cette optique, les tests fonctionnels basés sur des lancers de balle à bras cassé ou de médecine ball (depuis la position assise, en style « shot put ou lancer de poids » ou en lancer latéral type « passe de rugby ») se sont largement répandus. Plusieurs études ont révélé des corrélations significatives entre la performance à ces tests et celle au service (Ellenbecker & Roetert, 2004 ; Fernandez-Fernandez et al., 2019 ; Fett et al., 2020 ; Sánchez-Pay et al., 2021). Sánchez-Pay et al. (2021) ont par exemple mis en évidence une corrélation siginificative très forte ($r = 0{,}93$) entre la performance au lancer de médecine ball en « shot put » et la vitesse de balle au service chez 16 joueurs de tennis de niveau national et professionel. Des corrélations significatives ont

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

aussi été obtenues entre la performance au lancer latéral de médecine ball (SMBT) et la vitesse de balle au service chez 1 019 joueurs de tennis élite juniors (Fett et al., 2020). Reid et al. (2015) ont comparé la cinématique du tronc lors d'un lancer à bras cassé au-dessus de la tête (souvent utilisé par les entraîneurs comme base pédagogique pour enseigner le service) à celle du service chez 28 joueuses de tennis expertes. Des similitudes ont été mises en évidence entre ces deux mouvements avec des corrélations significatives mais faibles pour l'angle maximal de séparation hanches/épaules ($r = 0{,}44$) et la vitesse maximale de rotation longitudinale du tronc ($r = 0{,}39$).

Dans d'autres mouvements sportifs impliquant une forte rotation longitudinale du tronc comme le pitch au baseball ou le swing au golf, la majorité des travaux ont montré qu'il existe un lien entre les capacités de dissociation, les amplitudes de rotation maximale du tronc et la cinématique du tronc. En golf, il a été démontré que la capacité à réaliser de grandes amplitudes de rotation thoracique lors du STRT semble favoriser la rotation de la colonne vertébrale pendant la phase de préparation du swing (Gould et al., 2021) et la vitesse maximale de rotation longitudinale du pelvis pendant la phase d'accélération (Speariett & Armstrong, 2020). En baseball, Stodden et al. (2008) ont montré que les amplitudes de rotation longitudinale du tronc lors du SMBT (entre 50 et 60°) étaient similaires à celles observées lors du pitch, bien que les vitesses angulaires maximales du pelvis et du thorax étaient significativement inférieures. Okamura et Iida (2024) ont montré que les joueurs de baseball avec les capacités de rotation maximale du tronc les plus élevées présentaient les angles de séparation hanches/épaules les plus importants mais les rotations longitudinales du tronc les plus faibles au moment de l'armée. A l'inverse, seuls Bullock et al. (2020) n'ont observé aucune corrélation significative entre l'amplitude maximale de rotation longitudinale des épaules mesurée lors du STRT et la cinématique du tronc lors du pitch au baseball.

En tennis, déterminer si et comment l'amplitude de mouvement du tronc et la capacité de dissociation entre les hanches et les épaules mesurées lors de tests cliniques et fonctionnels interagissent avec la cinématique du tronc au cours du service pourrait contribuer à une meilleure compréhension de la variabilité inter-individuelle. Une telle approche pourrait également permettre d'identifier certaines contraintes organismiques contribuant à l'émergence des stratégies motrices observées dans l'étude précédente. Comprendre le lien entre les évaluations cliniques et biomécaniques pourrait aussi aider les cliniciens, les scientifiques et les entraîneurs à mettre au point des interventions efficaces pour accompagner les joueurs dans l'utilisation de rotation longitudinale du tronc au service.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

L'objectif de cette étude est donc de déterminer si les capacités de dissociation, les amplitudes et les vitesses de rotation longitudinale du tronc mesurées lors de tests cliniques et fonctionnels (STRT et SMBT) sont corrélées à la cinématique du tronc et à la performance au service. Nous émettons les hypothèses suivantes :

— les angles de séparation maximaux évalués avec le STRT et le SBMT sont significativement corrélés à l'angle de séparation maximal observé lors au service, mais pas à la vitesse de balle

— les angles maximaux de rotation des hanches et des épaules mesurés lors du SMBT sont significativement corrélés à ceux observés au service, mais pas à la vitesse de balle

6.3.2 Méthodologie spécifique à l'étude

6.3.2.1 Participants

Au total, 22 joueurs de tennis experts (20 droitiers et 2 gauchers ; âge : 20,0 ± 3,7 ans ; taille : 1,87 ± 0,07 m ; masse corporelle : 78,8 ± 7,2 kg) ont participé volontairement à cette étude. Les critères d'inclusion exigeaient un âge minimal de 16 ans et la capacité à servir à une vitesse supérieure à 160 km · h^{-1}. Parmi eux, 17 étaient classés à l'ATP, 4 figuraient dans le classement ITF juniors et 1 joueur appartenait à la 2nde série française. Aucun des participants ne présentait de blessure ou de douleur susceptible d'altérer sa performance au service et lors des tests cliniques et fonctionnels au moment de l'expérimentation.

6.3.2.2 Protocole expérimental

À la suite de la session de capture du mouvement du service en 3D (voir protocole et méthodologie détaillés au chapitre 4), chaque joueur a réalisé les 2 tests suivants dans le même ordre :

— **Seated Trunk Rotation Test (STRT)** : Le STRT permet d'évaluer l'angle de séparation entre les épaules et les hanches, en mesurant l'amplitude de rotation maximale du thorax lorsque le bassin est maintenu fixe. Ce test est reconnu pour sa validité et sa reproductibilité dans l'évaluation de la mobilité thoracique chez l'adulte en bonne santé (K. D. Johnson et al., 2012). Les mouvements du tronc ont été enregistrés à l'aide du même système Qualysis de capture du mouvement que celui utilisé pour le service (Oqus 7+, Qualisys AB, Göteborg, Suède), composé de

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

23 caméras optoélectroniques opérant à une fréquence d'acquisition de 300 Hz. Les marqueurs corporels étaient placés selon la même configuration que celle décrite pour l'analyse du service. Les participants étaient assis sur un siège standardisé, les hanches et les genoux fléchis à 90° , avec un ballon de 21 cm de diamètre placé entre les genoux (Figure 6.12). Ils devaient maintenir une légère pression sur le ballon afin de limiter les compensations du bassin. À partir de cette position, ils réalisaient une rotation maximale du tronc, d'abord d'un côté (vers la droite ou la gauche), puis de l'autre. Trois essais étaient effectués de chaque côté, et le sens de rotation était randomisé entre les participants. L'angle de séparation maximal entre les épaules et les hanches dans le plan transverse atteint pour chaque côté était ensuite moyenné entre les trois essais, conformément aux méthodologies utilisées dans des études antérieures (Bullock et al., 2020 ; K. D. Johnson et al., 2012).

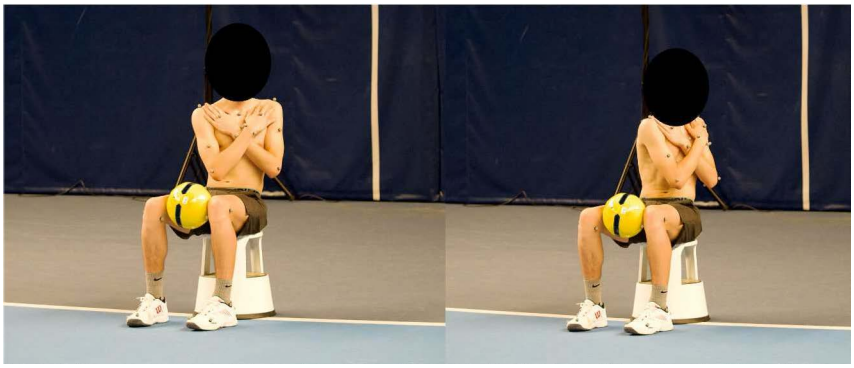


FIGURE 6.12 – Seated trunk Rotation test (STRT)

— **Side Medicine Ball Throw (SMBT)** : Nous avons choisi le SMBT en raison de sa forte validité externe pour les frappes au tennis (Fernandez-Fernandez et al., 2014). En effet, il s'agit d'un test actif, réalisé à haute vitesse, impliquant une dissociation entre les hanches et les épaules, des vitesses élevées de rotation longitudinale du thorax et du pelvis (Stodden et al., 2008), ainsi que des qualités de puissance et d'explosivité musculaires au niveau de la rotation du tronc (Ikeda et al., 2006). Le protocole retenu était conforme à ceux décrits dans les travaux ayant analysé la cinématique du tronc lors de lancers latéraux de médecine ball (Ikeda et al., 2006 ; Stodden et al., 2008). Les participants étaient positionnés derrière la ligne de fond de court, avec les appuis alignés perpendiculairement à la direction du lancer (Figure 6.13). Chaque joueur devait tenir un médecine ball de 2 kg (diamètre : 22 cm) au

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

niveau du tronc, les bras tendus en direction du filet. À partir de cette position, une rotation du tronc était effectuée dans la direction opposée au lancer, suivie d'une rotation rapide et explosive dans la direction du filet pour projeter le médecine ball le plus loin possible. Aucune autre consigne technique spécifique n'a été donnée, permettant ainsi aux participants de réaliser le mouvement de la manière la plus naturelle possible. Chaque joueur a réalisé trois lancers de chaque côté (côtés droit et gauche), dans un ordre randomisé. Comme pour le test STRT, le mouvement du corps entier a été enregistré à l'aide du système de capture de mouvement Qualisys.

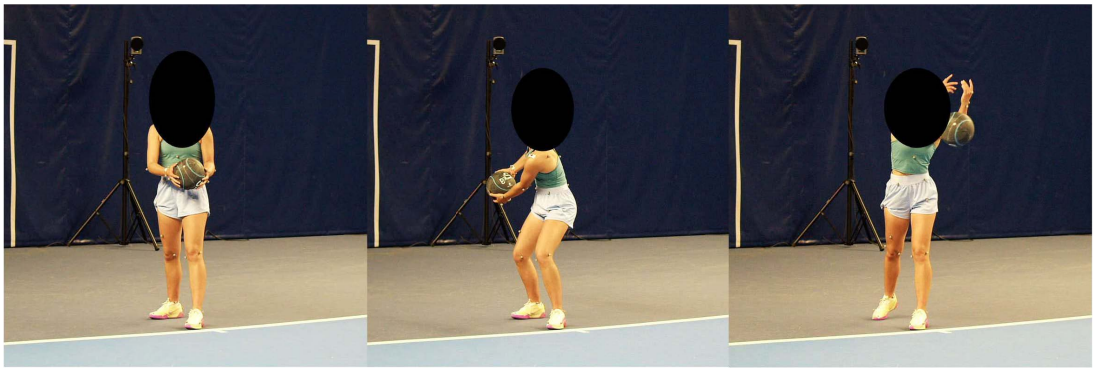


FIGURE 6.13 – Side Medicine Ball Throw (SMBT).

6.3.2.3 Variables d'intérêt

Le Tableau 6.10 présente l'ensemble des paramètres mesurés lors du service et des tests STRT et SMBT. Pour ces deux derniers, seules les données du côté dominant (sur la droite pour les joueurs droitiers et sur la gauche pour les joueurs gauchers) ont été analysées afin d'évaluer la rotation longitudinale du tronc du même côté que celle produite lors du service. Ce choix méthodologique est également étayé par des travaux antérieurs indiquant que l'angle de séparation maximal mesuré lors du STRT, lorsque la rotation thoracique est réalisée avec un bassin maintenu fixe, ne diffère pas significativement entre les deux côtés (Bullock et al., 2020). Les méthodes de calcul des variables d'intérêt autour de l'axe longitudinal (angle de séparation, vitesses de rotation du pelvis et du thorax) sont décrites dans l'étude 3.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Service	**STRT**	**SMBT**
— vitesse de balle pour les 5 services réussis ($km \cdot h^{-1}$) — θ^{max} Épaules–Service : Angle maximal des épaules par rapport à la ligne de fond de court lors du service (°) — θ^{max} Hanches–Service : Angle maximal des hanches par rapport à la ligne de fond de court lors du service (°) — θ^{max} Séparation–Service : Angle de séparation maximal lors du service (°) — ω^{max} Pelvis–Service : Vitesse maximale de rotation longitudinale du pelvis lors du service ($° \cdot s^{-1}$) — ω^{max} Thorax–Service : Vitesse maximale de rotation longitudinale du thorax lors du service ($° \cdot s^{-1}$)	— θ^{max} Séparation–STRT : Angle de séparation maximal atteint lors du STRT défini comme l'angle entre les épaules et les hanches correspondant à l'amplitude maximale de rotation du tronc lorsque le bassin est maintenu fixe (°)	— θ^{max} Épaules–SMBT : Angle maximal des épaules par rapport à la ligne de fond de court lors du SMBT (°) — θ^{max} Hanches–SMBT : Angle maximal des hanches par rapport à la ligne de fond de court lors du SMBT (°) — θ^{max} Séparation–SMBT : Angle de séparation maximal entre les épaules et les hanches lors du SMBT (°) — ω^{max} Pelvis–SMBT : Vitesse maximale de rotation longitudinale du pelvis lors du SMBT ($° \cdot s^{-1}$) — ω^{max} Thorax–SMBT : Vitesse maximale de rotation longitudinale du thorax lors du SMBT ($° \cdot s^{-1}$)

TABLE 6.10 – Variables mesurées lors du service et lors des tests STRT (Seated Trunk Rotation Test) et SMBT (Side Medicine Ball Throw). θ : angle ; ω^{max} : vitesse maximale de rotation longitudinale.

6.3.2.4 Analyses statistiques

Les moyennes et les écarts-types ont été calculés pour l'ensemble des variables cinématiques. La normalité des distributions a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro-Wilk. Des tests de Pearson ont été utilisés pour déterminer les corrélations entre les paramètres cinématiques du service et ceux des tests (STRT et SMBT). Lorsque l'hypothèse de normalité n'était pas respectée, des tests de Spearman ont été appliqués. Conformément aux seuils fréquemment utilisés dans la littérature scientifique, les corrélations ont été considérées comme faibles lorsque le coefficient variait entre 0,25 et 0,5, modérées entre 0,5 et 0,75, et fortes au-delà de 0,75 (Portney & Watkins, 2015). Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel RStudio (version 2024.04.1, R Foundation for Statistical Computing, Vienne, Autriche). Les valeurs de p ont été ajustées à l'aide de la méthode de Benjamini-Hochberg, pour contrôler le taux de faux positifs. Le seuil de significativité a été fixé à $p = 0{,}05$.

6.3.3 Résultats

6.3.3.1 Données descriptives

Les moyennes et écarts-types de l'ensemble des variables mesurées lors du service et lors des tests de SMBT et STRT sont présentés dans le Tableau 6.11.

	Service	**SMBT**	**STRT**
Vitesse de balle ($km \cdot h^{-1}$)	$181{,}5 \pm 11{,}3$	/	/
θ^{max} Épaules (°)	$-108{,}1 \pm 15{,}4$	$-167{,}1 \pm 20{,}9$	/
θ^{max} Hanches (°)	$-96{,}4 \pm 11{,}9$	$-115{,}9 \pm 14{,}0$	/
θ^{max} Séparation (°)	$26{,}4 \pm 11{,}3$	$52{,}6 \pm 8{,}3$	$60{,}9 \pm 7{,}5$
ω^{max} Pelvis ($° \cdot s^{-1}$)	$484{,}0 \pm 54{,}9$	$458{,}2 \pm 84{,}9$	/
ω^{max} Thorax ($° \cdot s^{-1}$)	$621{,}3 \pm 77{,}2$	$701{,}5 \pm 86{,}7$	/

TABLE 6.11 – Moyennes et écarts-types de la vitesse de balle et des paramètres cinématiques mesurés lors du service, du SMBT et du STRT. SMBT : Side Medicine Ball Throw ; STRT : Seated Trunk Rotation Test ; θ : angle ; ω^{max} : vitesse maximale de rotation longitudinale.

6.3.3.2 Corrélations entre les paramètres mesurés lors du STRT et ceux mesurés lors du service

Aucune corrélation significative n'a été obtenue entre θ^{max} Séparation–STRT et θ^{max} Séparation–Service ($r = 0{,}29$, $p = 0{,}189$), ni entre θ^{max} Séparation – STRT et la vitesse

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

de balle au service ($r = -0,21$, $p = 0{,}356$).

6.3.3.3 Corrélations entre les paramètres mesurés lors du SMBT et ceux mesurés lors du service

Aucun des paramètres cinématiques mesurés lors du SMBT (θ^{max} Épaules, θ^{max} Hanches, θ^{max} Séparation, ω^{max} Pelvis et ω^{max} Thorax) n'est significativement corrélé à ceux mesurés lors du service ni à la vitesse de balle (Tableau 6.12).

Variables testées entre Service et SMBT	***r***	***p***	***p* ajusté (BH)**
θ^{max} Épaules–Service / θ^{max} Épaules–SMBT	0,07	0,766	0,922
Vitesse de balle / θ^{max} Épaules–SMBT	0,21	0,357	0,714
θ^{max} Hanches–Service / θ^{max} Hanches–SMBT	0,04	0,843	0,922
Vitesse de balle / θ^{max} Hanches–SMBT	0,30	0,200	0,666
θ^{max} Séparation–Service / θ^{max} Séparation–SMBT	0,04	0,843	0,922
Vitesse de balle / θ^{max} Séparation–SMBT	0,02	0,922	0,922
ω^{max} Pelvis–Service / ω^{max} Pelvis–SMBT	–0,03	0,899	0,500
Vitesse de balle / ω^{max} Pelvis–SMBT	0,36	0,100	0,500
ω^{max} Thorax–Service / ω^{max} Thorax–SMBT	0,21	0,356	0,714
Vitesse de balle / ω^{max} Thorax–SMBT	0,39	0,072	0,500

TABLE 6.12 – Corrélations de Pearson et de Spearman entre les paramètres cinématiques du service et ceux du SMBT, ainsi que entre les paramètres cinématiques du SMBT et la vitesse de balle. r : coefficient de corrélation de Pearson ou de Spearman ; p : valeur de p brute ; p ajusté (BH) : valeur de p corrigée selon la méthode de Benjamini–Hochberg ; SMBT : Side Medicine Ball Throw ; θ : angle ; ω^{max} : vitesse maximale de rotation longitudinale.

6.3.4 Discussion

L'objectif de cette étude était de déterminer si les capacités de dissociation, les amplitudes et les vitesses de rotation longitudinale du tronc mesurées lors de tests cliniques et fonctionnels sont corrélées à la cinématique du tronc et à la performance au service. Contrairement à nos hypothèses, les résultats ont révélé une absence de corrélation significative entre les variables mesurées lors de ces tests et celles du service.

Le STRT permet d'évaluer l'angle de séparation entre les épaules et les hanches, en mesurant l'amplitude de rotation maximale du thorax lorsque le bassin est maintenu fixe. Dans notre étude, la moyenne de cet angle (60,9 ± 8,3°) est proche de celle mesurée chez des joueurs de tennis compétiteurs de club (71,4 ± 11,4°) (Palmer et al., 2018). Elle est

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

comparable à celle obtenue chez des joueurs de baseball (61,0 ± 10,8°) (Bullock et al., 2020) et dans la population adulte générale (55,4 ± 9,2°) (K. D. Johnson et al., 2012). En revanche, l'angle maximal de séparation au service (26,4 ± 11,3°) est beaucoup plus faible que celui obtenu lors du STRT. Cela montre que la dissociation maximale des joueurs dans le contexte fonctionnel et dynamique du service est bien inférieure à celle qu'ils sont capables d'atteindre dans un test semi-actif tel que le STRT. De plus, nos résultats montrent une absence de corrélation entre l'angle de séparation maximal au service et celui mesuré lors du STRT. Ces résultats peuvent s'expliquer par l'implication différente du bassin entre les deux tâches : pendant le service, le bassin est libre de bouger et de participer activement à la rotation, alors que pendant le STRT, le bassin est fixe, ce qui modifie la mécanique du mouvement (Montgomery et al., 2011). En définitive, la capacité maximale de dissociation semi-active entre les épaules et les hanches des joueurs de tennis mesurée lors STRT n'est pas associée de manière significative à la cinématique du tronc au cours du service et ne semble donc pas constituer une contrainte « organismique » au sens de la théorie dynamique du contrôle moteur. Elle ne permet pas, dans le cadre de ce protocole, d'expliquer la variabilité inter-individuelle ou l'émergence des stratégies motrices mises en évidence dans les études précédentes de cette thèse.

Par ailleurs, l'absence de corrélation significative entre l'angle maximal de séparation au STRT et la vitesse de balle au service, résultat attendu, confirme les résultats des études 3 et 4 : la capacité à dissocier les lignes des épaules et des hanches dans le plan transverse n'est pas un facteur déterminant de la performance au service. Nos résultats corroborent aussi ceux de Bullock et al. (2020), qui ont rapporté une absence de corrélation entre les angles de séparation mesurés lors du STRT et ceux observés lors du pitch chez les joueurs de baseball.

Concernant le SMBT, les angles de rotation maximale des épaules et des hanches atteints pendant notre étude (−167± 21° ; −116 ± 14°, respectivement), dépassent ceux rapportés par Ikeda et al. (2009) chez des joueurs de baseball lors d'un test proche, appelé FSMBT pour « Fast Side Medicine Ball Throwing » (−134 ± 28°, −59 ± 26°, respectivement). Ces écarts peuvent s'expliquer par des différences d'ordre méthodologique entre les deux tests influençant l'amplitude de rotation maximale : le protocole du FSMBT demande aux joueurs de lancer le médecine ball aussi vite que possible et privilégie donc la vitesse d'exécution du lancer alors que celui du SMBT les invite à lancer le médecine ball le plus loin possible (Ikeda et al., 2006). Il a été démontré que ces consignes divergentes influencent les amplitudes maximales de rotation au niveau du tronc (Ikeda et al., 2006).

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Comme au service, le SMBT mobilise la rotation longitudinale du tronc de façon explosive, d'abord dans la direction opposée à celle du lancer (« vissage » en phase de préparation), puis dans la direction du lancer (« dévissage » en phase propulsive) (Ikeda et al., 2009). Le service et le SMBT présentent aussi des similitudes sur le plan musculaire, notamment par une forte sollicitation du muscle oblique externe controlatéral (M. B. Anderson, 1979 ; Vera-García et al., 2014) via le principe du cycle étirement-raccourcissement (Henchoz et al., 2006) ainsi que sur le plan cinématique, avec des vitesses maximales de rotation longitudinale du pelvis comparables. Malgré ces points communs, les paramètres cinématiques mesurés lors du SMBT ne sont pas corrélés à ceux mesurés lors du service, ni à la vitesse de balle. Autrement dit, les joueurs qui présentent la capacité de dissociation la plus importante dans une tâche active et explosive telle qu'un lancer de médecine ball latéral ne sont pas ceux qui dissocient le plus les hanches des épaules au cours du service, ni les plus performants. De même, ceux qui atteignent les amplitudes maximales de rotation longitudinale des épaules et des hanches les plus élevées lors du SMBT ne sont pas ceux qui les atteignent lors du service, ni qui servent le plus fort. Là encore, ce résultat suggère que les capacités à dissocier les épaules et les hanches, à atteindre des amplitudes de rotation importantes autour de l'axe longitudinal dans un mouvement fonctionnel et explosif tel que le SMBT, n'influencent ni la performance, ni la cinématique du tronc au service. Ces capacités fonctionnelles ne semblent donc pas être à l'origine de la variabilité inter-individuelle et des stratégies motrices mises en évidence dans les études précédentes de cette thèse.

L'absence de corrélation entre le SMBT et le service concernant la cinématique du tronc peut s'expliquer par des différences biomécaniques notables entre ces deux mouvements. Le service implique une frappe au-dessus de la tête à très haute vitesse entre une raquette et une balle pour projeter cette dernière en direction d'une cible (le carré de service adverse) et au-dessus d'un filet, ce qui nécessite une coordination fine, ainsi qu'un haut niveau de précision et de contrôle. À l'inverse, le SMBT consiste à projeter un médecine ball le plus loin possible, sans contrainte directionnelle forte, ni exigence particulière de précision, ce qui en fait une tâche techniquement moins exigeante et plus axée sur la production de puissance. La cinématique du service implique des rotations dans les 3 plans de l'espace alors que celle du SMBT s'effectue presque exclusivement autour de l'axe longitudinal. Les vitesses maximales de rotation mesurées lors du SMBT ne sont pas non plus corrélées à la vitesse de balle. Cela signifie que les joueurs qui sont les plus explosifs » et affichent les vitesses maximales de rotation longitudinale du pelvis

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

et du thorax les plus élevées lors du SMBT ne sont pas ceux qui les atteignent au service, ni qui servent le plus fort. Ce résultat pourrait s'expliquer par le rôle moins déterminant de la rotation longitudinale dans la performance au service (Bahamonde, 2000 ; Martin, Kulpa, Delamarche & Bideau, 2013) que dans celle du SMBT. Certaines études suggèrent que d'autres formes de lancers de médecine ball, tels que ceux réalisés au-dessus de la tête (« overhead ») ou en style « shot put », mobilisant davantage les rotations autour des axes transverse et/ou antéro-postérieur, seraient plus proches du geste du service en termes de transfert d'énergie et de schéma de rotation segmentaire (Reid et al., 2015 ; Sánchez-Pay et al., 2021). Bien qu'ils ne mesurent pas directement la dissociation au niveau du tronc, ces tests présenteraient un profil cinématique potentiellement plus représentatif du service.

Notre étude s'est limitée à l'analyse de deux tests cliniques et fonctionnels (STRT et SMBT). L'inclusion d'autres tests intégrant des lancers de médecine ball au-dessus de la tête, aurait pu enrichir l'analyse. Parmi les autres limites de cette étude, il convient de mentionner l'absence de mesure de performance au SMBT (par exemple, la distance de lancer), ce qui aurait permis de croiser les données cinématiques mesurées, la vitesse de balle au service et un indicateur de performance propre au test.

En termes de perspectives, et pour mieux comprendre la variabilité inter-individuelle et l'émergence des différentes stratégies motrices concernant la rotation longitudinale du tronc mises en évidence dans cette thèse, de futures études devraient s'intéresser à d'autres paramètres physiques tels que les qualités de force musculaire. Par ailleurs, les ouvrages spécialisés et les publications techniques à destination des entraîneurs de tennis (Dorochenko, 2013 ; Garipuy & Wolff, 1999 ; Martin, 2018 ; Vicencio, 2014) émettent l'hypothèse selon laquelle la latéralité oculo-manuelle pourrait influencer la biomécanique du service et notamment la cinématique du tronc autour de l'axe longitudinal, même si cela n'a jamais été vérifié sur le plan scientifique. L'étude suivante de ce travail de thèse s'intéressera à cette question.

6.3.5 Conclusion

Les capacités de dissociation et les amplitudes maximales de rotation du tronc dans le plan transverse, évaluées par un test clinique (STRT) et un test fonctionnel (SMBT), n'influencent pas la cinématique du tronc lors du service. Elles ne constituent donc pas des contraintes « organismiques » au sens de la théorie dynamique du contrôle moteur et n'expliquent donc ni la variabilité inter-individuelle ni les stratégies motrices mises en

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

évidence dans les études précédentes. De futurs travaux devront se pencher sur d'autres facteurs pouvant influencer les rotations du tronc autour de l'axe longitudinal.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Chapitre 7

Latéralité oculo-manuelle et service au tennis

7.1 Étude 6 : Effet de la latéralité oculo-manuelle sur la biomécanique du service

7.1.1 Introduction

La majorité des individus préfère utiliser un côté du corps plutôt que son homologue symétrique pour effectuer des tâches motrices. Cette préférence, appelée latéralité, repose sur une organisation asymétrique du système nerveux central et une spécialisation des hémisphères (Annett, 2004 ; Corballis, 2009 ; Papadatou-Pastou et al., 2020). Parmi les différentes formes de latéralité existantes, la latéralité manuelle se définit comme la prédominance d'une main sur l'autre dans des tâches uni-manuelles (Scharoun & Bryden, 2014). En tennis, elle fait référence à la main préférentielle utilisée pour tenir la raquette et exécuter les frappes. Une autre forme de latéralité, également étudiée dans la littérature scientifique et particulièrement pertinente en tennis (Dorochenko, 2013 ; Mavvidis et al., 2018 ; Ziagkas et al., 2017), concerne la latéralité ou dominance oculaire. Celle-ci est le plus souvent définie par la dominance d'alignement (ou œil de visée), qui constitue la référence dans les travaux scientifiques (Mapp et al., 2003 ; Porac & Coren, 1976).

La combinaison de la latéralité manuelle et de la latéralité oculaire définit la latéralité oculo-manuelle. Cette dernière peut prendre deux formes : on parle de latéralité oculo-manuelle « homogène », lorsque l'œil dominant et la main dominante se trouvent du même côté et de latéralité oculo-manuelle « croisée », lorsque l'œil directeur est du côté opposé à la main dominante. Dans la population générale, la latéralité oculo-manuelle tend à suivre une organisation majoritairement « homogène ». Les profils « croisés » sont moins fréquents et concerneraient environ un tiers des individus (Bourassa, 1996 ;

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Robison et al., 1999). Cette répartition semble se modifier dans le contexte du sport de haut niveau. Une revue systématique réalisée par Moreno et al. (2022) a mis en évidence une surreprésentation des profils « croisés » dans des disciplines telles que le golf (53 %), le football (53 %), les sports collectifs (51 %). En tennis, une tendance similaire a été observée, avec une prévalence de 42 % de joueurs avec une latéralité « croisée ». Cette surreprésentation des profils « croisés » dans le haut niveau pourrait être liée à une économie dans le transfert interhémisphérique, permettant un temps de réaction plus rapide dans les situations d'opposition (Azémar et al., 2008).

Connaître le profil d'un athlète, qu'il s'agisse de sa dominance oculaire ou de sa latéralité oculo-manuelle semble être fondamental dans un souci d'optimisation de la performance. En effet, la latéralité ne se limite pas à une simple préférence gauche-droite. Elle reflète des schémas de coordination complexes entre l'œil dominant, les membres effecteurs (segments corporels et raquette) et l'organisation spatiale du corps dans son environnement (Azémar et al., 2008 ; Castañer et al., 2018). Elle s'avère essentielle pour faire face aux exigences temporelles et spatiales propres aux sports à habiletés ouvertes (Ceyte et al., 2017 ; Erickson, 2007). Dans les duels sportifs tels que le tennis, la latéralité oculo-motrice est importante car la performance dépend d'une interaction étroite entre les yeux (en tant qu'organes récepteurs de l'information visuelle) et le membre qui tient la raquette (en tant qu'organe effecteur) (Azémar et al., 2008). Au service, le contact visuel avec la balle lors du lancer est fondamental, d'autant plus qu'il s'accompagne de la nécessité de viser une cible précise située dans le carré de service en diagonale (Knudson et al., 1994). Giblin et al. (2017) ont montré que le fait de fermer les yeux pendant le service et donc de supprimer le feedback visuel perturbe significativement la cinématique de la raquette et la trajectoire du lancer de balle. Par conséquent, ils estiment que le service ne peut pas être considéré comme un mouvement totalement préprogrammé, et que le feedback visuel joue un rôle essentiel dans sa régulation spatio-temporelle. Entre le moment où le joueur lance la balle et l'impact, la dominance oculaire pourrait influencer la précision de l'ajustement visuo-moteur, notamment à l'approche du contact balle–raquette (Mavvidis et al., 2018).

Le geste du service peut être appréhendé à travers le prisme de la théorie dynamique du contrôle moteur, qui considère le mouvement comme un phénomène en constante adaptation, devant être analysé dans sa globalité et non de manière figée (Davids et al., 2003 ; Elliott et al., 2009). Cette approche considère le mouvement comme une émergence résultant de l'interaction entre différentes contraintes : celles de l'environnement (comme

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

la présence ou non d'un adversaire), de la tâche (frapper une balle en direction du carré de service adversaire en franchissant au préalable un filet), et de l'organisme (comme la taille du joueur, sa masse corporelle, sa force musculaire...) (Davids et al., 2003 ; Newell, 1986). En natation, la latéralité est perçue comme une contrainte organismique (Seifert et al., 2014), car il a été démontré que le côté préférentiel pour respirer et la latéralité manuelle influencent la coordination motrice en crawl (Seifert et al., 2005 ; Seifert et al., 2008 ; Tourny-Chollet et al., 2009). Dans d'autres sports tels que le basket-ball (Lopez-Diaz et al., 2015), le cricket (Mann et al., 2016) et le golf (Sugiyama & Lee, 2005), la latéralité oculo-manuelle semble influencer l'exécution technique de certains gestes. En tennis, nous ne savons pas si la latéralité oculo-manuelle constitue une contrainte de l'organisme pouvant influencer les coordinations motrices au service.

À ce jour, aucune étude n'a examiné l'impact de la latéralité oculo-manuelle sur la biomécanique du service, alors même que cette notion suscite un intérêt croissant dans les ouvrages spécialisés et les publications techniques à destination des entraîneurs (Dorochenko, 2013 ; Garipuy & Wolff, 1999 ; Martin, 2018 ; Vicencio, 2014). Ces sources avancent plusieurs hypothèses intéressantes reliant la latéralité oculo-manuelle à la cinématique du tronc, ainsi qu'à la position latérale d'impact. Garipuy et Wolff (1999) ont avancé que la latéralité oculo-manuelle « croisée » induirait une plus grande amplitude de rotation longitudinale du haut du corps. Ils ont aussi souligné que des vitesses de balle au service supérieures à 200 km $\cdot$ h^{-1} ont été atteintes aussi bien par des joueurs de haut niveau « homogènes » que « croisés », ce qui laisse supposer que la latéralité oculo-manuelle n'aurait pas d'effet sur la vitesse de balle. De son côté, Dorochenko (2013) a suggéré que les joueurs « croisés » auraient tendance à frapper la balle davantage sur leur côté non dominant que les joueurs « homogènes » pour aligner l'œil directeur avec la position d'impact. Ces hypothèses n'ont pour le moment jamais été validées sur le plan scientifique. À ce jour, seules deux études se sont penchées sur l'influence de la latéralité oculo-manuelle sur la précision au service (Mavvidis et al., 2018 ; Ziagkas et al., 2017). Aucune différence significative n'a été observée entre les joueurs « croisés » et « homogènes », même si une tendance vers une meilleure précision des joueurs « croisés » a été relevée dans la diagonale des égalités. Malheureusement, ces travaux présentent plusieurs limites. L'étude de Mavvidis et al. (2018) a évalué la dominance oculaire de joueurs professionnels à partir de photographies trouvées sur internet, sans recours à un protocole de mesure direct. L'étude de Ziagkas et al. (2017) reposait uniquement sur un échantillon de joueurs amateurs débutants pour lesquels la maîtrise gestuelle du service était limitée. Aucune de ces deux études n'a in-

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

tégré de mesures cinématiques, ni considéré d'autres paramètres de performance tels que la vitesse de balle ou la position d'impact.

Déterminer si la latéralité oculo-manuelle influence la performance au service ainsi que la cinématique du tronc et la position de l'impact serait très utile aux entraîneurs. Cela permettrait, d'une part, de répondre aux nombreuses interrogations à ce sujet, et d'autre part, d'adapter plus finement l'entraînement et les conseils fournis aux joueurs. L'objectif de cette étude est donc de comparer la performance, la position d'impact, la cinématique du tronc autour de l'axe longitudinal et celle du membre supérieur dominant à l'impact, entre deux groupes de joueurs de tennis experts présentant d'un côté, une latéralité oculo-manuelle « homogène » et de l'autre, une latéralité oculo-manuelle « croisée ». Les hypothèses formulées sont les suivantes :

— la vitesse de balle est similaire entre les joueurs « homogènes » et « croisés »

— les joueurs « croisés » frappent davantage la balle sur leur coté non dominant (plus à gauche pour les droitiers et plus à droite pour les gauchers), induisant des différences cinématiques au niveau du tronc et du membre supérieur qui tient la raquette

7.1.2 Méthodologie spécifique à l'étude

7.1.2.1 Participants

40 joueurs de tennis experts (25 hommes et 15 femmes ; 38 droitiers et 2 gauchers ; âge : 19,9 ± 3,9 ans ; taille : 1,81 ± 0,10 m ; masse corporelle : 74,3 ± 9,1 kg) ont participé volontairement à cette étude. Parmi eux, 31 joueurs servaient avec la technique du relais d'appui et 9 autres utilisaient la technique des appuis écartés. 31 joueurs possédaient un classement professionnel (ATP ou WTA) et 9 joueurs étaient classés en 2nde série française (classement FFT). Aucun des participants ne présentait de blessure ou de douleur susceptible d'altérer sa performance au service au moment de l'expérimentation.

7.1.2.2 Évaluation de la dominance oculaire et manuelle

La dominance oculaire a été déterminée à l'aide du test « hole-in-card test » (Durand & Gould, 1910 ; Miles, 1930) (Figure 7.1). Bien que ce test ait été développé au début du XXe siècle, il est toujours considéré comme l'un des outils les plus utilisés et les plus fiables pour identifier la dominance oculaire d'alignement de type « sighting » (l'œil préférentiellement utilisé lors d'une tâche de visée monoculaire). Il présente en outre l'avantage d'être simple

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

à mettre en place et de démontrer une bonne fiabilité (Coren & Kaplan, 1973 ; Handa et al., 2004 ; Ho et al., 2018). Lors de ce test, chaque participant tenait à bout de bras une feuille rigide percée d'un trou de 0,5 cm de diamètre en son centre, et devait fixer un objet situé à 2 mètres de distance à travers ce trou. Il fermait ensuite un œil, puis l'autre : l'œil qui continuait à voir l'objet était alors identifié comme l'œil dominant. Afin d'assurer la robustesse de la mesure, chaque joueur a réalisé ce test à trois reprises. La latéralité manuelle a été définie comme la main (droite ou gauche) utilisée pour tenir la raquette au service. Les joueurs dont l'œil dominant et la main dominante étaient du même côté ont été classés comme « homogènes », et ceux présentant un œil dominant et une main dominante à l'opposé (exemple : droitier et œil dominant gauche) ont été classés dans le groupe des « croisés ».



FIGURE 7.1 – Mise en place du test « hole-in-card »

7.1.2.3 Capture de mouvement en 3D et protocole expérimental

La méthodologie et le protocole de capture du mouvement de service en 3D utilisés pour cette étude sont décrits dans le chapitre 4.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

7.1.2.4 Variables d'intérêt

La vitesse de balle, les positions latérale (X), antéro-postérieure (Y) et verticale (Z) de l'impact balle–raquette et les variables cinématiques liées à la rotation longitudinale du tronc ont été mesurées selon la procédure décrite au chapitre 6. Pour tous les joueurs, la position d'impact latérale (X) était rapportée à la position latérale du bout du pied avant (marqueur RTOE pour les droitiers et LTOE pour les gauchers) au moment de l'ARM (Figure 7.2). Pour les droitiers comme pour les gauchers, elle était positive lorsque l'impact se situait sur leur côté dominant (à droite de RTOE pour les droitiers et à gauche de LTOE pour les gauchers) et négative lorsqu'elle se situait sur leur côté non dominant (à gauche de RTOE pour les droitiers et à droite de LTOE pour les gauchers).

Les variables cinématiques du tronc concernaient les angles des hanches ($\theta^{\max}$ Hanches), des épaules ($\theta^{\max}$ Épaules) et les vitesses maximales de rotation longitudinale du pelvis ($\omega^{\max}$ Pelvis) et du thorax ($\omega^{\max}$ Thorax). Excepté $\omega^{\max}$ Pelvis et $\omega^{\max}$ Thorax, ces variables discrètes ont été analysées à trois moments-clés du geste, facilement identifiables par les entraîneurs : le lancer de balle (LB), la position armée (ARM), et le moment de l'impact balle–raquette (IMP).

D'autres paramètres cinématiques spécifiques ont également été mesurés au moment de l'IMP (Fleisig et al., 2003) (Figure 7.2) :

— θ^{IMP} Inclinaison Épaules : angle d'inclinaison latérale des épaules par rapport à l'horizontale

— θ^{IMP} Abduction Épaule : angle d'abduction de l'épaule dominante

— θ^{IMP} Extension Coude : angle interne d'extension du coude dominant

7.1.2.5 Analyses statistiques

Les moyennes et les écarts-types ont été calculés pour l'ensemble des variables. La normalité des distributions a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro-Wilk. Lorsque l'hypothèse de normalité était respectée, un test t de Student a été appliqué pour comparer les résultats entre les groupes « homogène » et « croisé ». Dans le cas contraire, un test non paramétrique de Mann-Whitney a été utilisé. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Jamovi (version 2.3.28.0). Le seuil de significativité a été fixé à $p = 0{,}05$.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

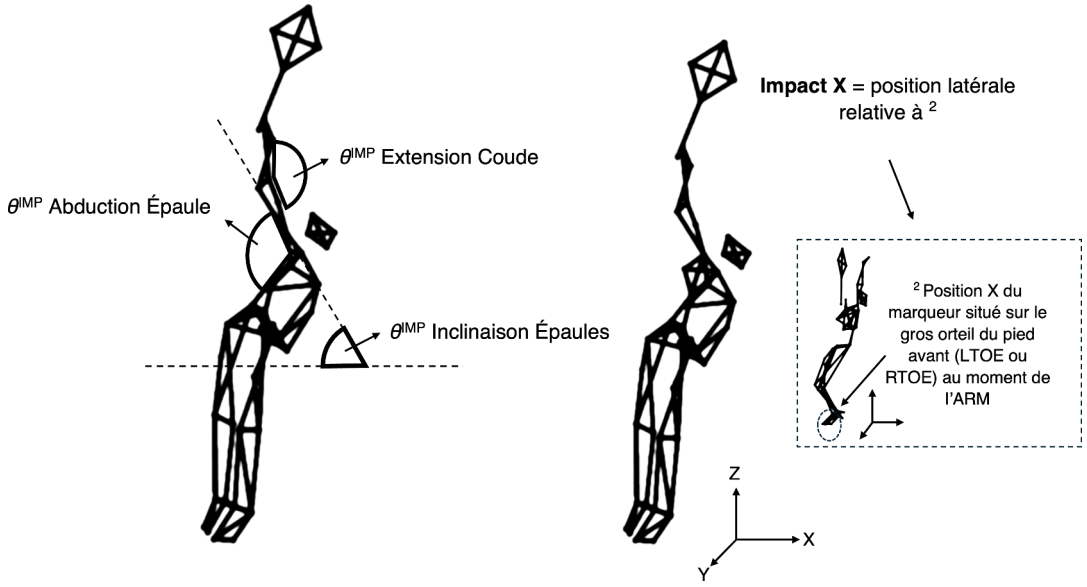


FIGURE 7.2 – Paramètres angulaires et position latérale d'impact (Impact X) calculés au moment de l'impact balle–raquette. θ^{IMP} : angle à l'impact balle–raquette ; LTOE : tête du gros orteil gauche ; RTOE : tête du gros orteil droit ; ARM : position armée.

7.1.3 Résultats

7.1.3.1 Caractéristiques anthropométriques, vitesse de balle et position d'impact

Le test « hole-in-card » a identifié 24 joueurs avec une latéralité oculo-manuelle « homogène » et 16 joueurs avec une latéralité oculo-manuelle « croisée ». Le test χ^2 ne montre aucune différence significative dans la répartition des hommes et des femmes entre les profils « homogène » et « croisé », étant donné qu'elle était la même dans les deux groupes (62,5 % d'hommes et 37,5 % de femmes) ($p = 1{,}000$). Aucune différence significative n'a été observée entre les deux groupes concernant la taille, la masse corporelle et la vitesse de balle (Tableau 7.1). Concernant l'impact, les joueurs « croisés » présentent une position latérale d'impact significativement plus sur leur côté non-dominant que les joueurs « homogènes » ($-0,26 \pm 0{,}15$ m contre $-0,12 \pm 0{,}17$ m ; $p = 0{,}012$). En revanche, aucune différence significative n'a été observée entre les deux groupes pour les positions d'impact antéro-postérieure (Y) et verticale (Z) (Tableau 7.1).

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

	Latéralité oculo-manuelle		
	Homogène ($n = 24$)	**Croisée ($n = 16$)**	**Test de Student / Mann–Whitney**
Variable	**Moyenne ± ET**	**Moyenne ± ET**	***p***
Taille (m)	1,82 ± 0,11	1,79 ± 0,10	0,322
Masse corporelle (kg)	74,2 ± 1,9	74,5 ± 9,4	0,919
Vitesse de balle ($km \cdot h^{-1}$)	173,5 ± 17,7	171,1 ± 16,3	0,659
Impact X (m)	$\mathbf{-0{,}12 \pm 0{,}17}$	$\mathbf{-0{,}26 \pm 0{,}15}$	$\mathbf{0{,}012}^*$
Impact Y (% de la taille)	32,6 ± 6,5	31,7 ± 8,0	0,613
Impact Z (% de la taille)	147,3 ± 3,9	148,7 ± 3,2	0,219

TABLE 7.1 – Comparaison des paramètres anthropométriques, de la vitesse de balle et des positions d'impact. * $p < 0{,}05$; ET : écart type ; Impact X : position latérale de l'impact ; Impact Y : position antéro-postérieure de l'impact ; Impact Z : position verticale de l'impact.

7.1.3.2 Paramètres cinématiques du tronc et du membre supérieur dominant

Aux moments du LB et de l'ARM, il n'existe aucune différence significative entre les deux groupes concernant θ Épaules et θ Hanches (Tableau 7.2), même si une tendance apparaît concernant l'angle des hanches à l'ARM. Par contre, au moment de l'IMP, le tronc des joueurs « homogènes » est davantage tourné vers le filet que les joueurs « croisés » puisque θ^{IMP} Épaules et θ^{IMP} Hanches sont significativement supérieurs ($4{,}4 \pm 14{,}2°$ *vs.* $-8,6 \pm 15{,}3°$; $p = 0{,}010$; $-7,6 \pm 9{,}4°$ *vs.* $-15,6 \pm 12{,}5°$; $p = 0{,}025$, respectivement).

Toujours au moment de l'IMP, les joueurs « croisés » présentent un angle d'inclinaison latérale des épaules par rapport à l'horizontale ($-55,6 \pm 6{,}4°$ *vs.* $-50,8 \pm 6{,}6°$; $p = 0{,}031$), et un angle d'extension du coude significativement plus élevés que les joueurs « homogènes » ($157{,}4 \pm 6{,}5°$ *vs.* $152{,}5 \pm 4{,}8°$; $p = 0{,}032$) (Tableau 7.2). A l'IMP, ils tendent aussi à produire un angle d'abduction de l'épaule plus important ($126{,}2 \pm 5{,}2°$ *vs.* $116{,}1 \pm 1{,}8°$; $p = 0{,}061$). Alors que la vitesse maximale de rotation longitudinale du thorax ne diffère pas entre les deux groupes, celle du pelvis tend à être significativement plus élevée chez les joueurs « homogènes » ($509{,}7 \pm 13{,}7 \ ° \cdot s^{-1}$ *vs.* $481{,}0 \pm 22{,}3 \ ° \cdot s^{-1}$; $p = 0{,}084$).

7.1.4 Discussion

L'objectif de cette étude était de déterminer l'influence de la latéralité oculo-manuelle sur la vitesse de balle et la position d'impact, ainsi que sur les paramètres cinématiques suivants : les angles et les vitesses maximales de rotation longitudinale des hanches et des épaules, l'inclinaison latérale du tronc, les angles d'extension du coude et d'abduction de

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

	Latéralité oculo-manuelle		
	Homogène ($n = 24$)	**Croisée ($n = 16$)**	**Test de Student / Mann–Whitney**
Variable	**Moyenne ± ET**	**Moyenne ± ET**	***p***
Paramètres angulaires au moment du LB			
θ^{LB} Rotation Épaules (°)	$-80{,}4 \pm 18{,}4$	$-81{,}7 \pm 20{,}0$	0,823
θ^{LB} Rotation Hanches (°)	$-86{,}6 \pm 14{,}3$	$-87{,}9 \pm 15{,}9$	0,790
Paramètres angulaires au moment de l'ARM			
θ^{ARM} Rotation Épaules (°)	$-104{,}4 \pm 13{,}1$	$-107{,}4 \pm 12{,}2$	0,605
θ^{ARM} Rotation Hanches (°)	$-90{,}5 \pm 11{,}7$	$-97{,}3 \pm 13{,}1$	0,090
Paramètres angulaires au moment de l'IMP			
θ^{IMP} Rotation Épaules (°)	$\mathbf{4{,}4 \pm 14{,}2}$	$\mathbf{-8{,}6 \pm 15{,}3}$	**0,010***
θ^{IMP} Rotation Hanches (°)	$\mathbf{-7{,}6 \pm 9{,}4}$	$\mathbf{-15{,}6 \pm 12{,}5}$	**0,025***
θ^{IMP} Inclinaison Épaules (°)	$\mathbf{-50{,}8 \pm 6{,}6}$	$\mathbf{-55{,}6 \pm 6{,}4}$	**0,031***
θ^{IMP} Abduction Épaule (°)	$116{,}1 \pm 1{,}8$	$126{,}2 \pm 5{,}2$	0,061
θ^{IMP} Extension Coude (°)	$\mathbf{152{,}5 \pm 4{,}8}$	$\mathbf{157{,}4 \pm 6{,}5}$	**0,032***
Vitesses de rotation maximales			
ω^{max} Pelvis ($^\circ \cdot \mathrm{s}^{-1}$)	$509{,}7 \pm 13{,}7$	$481{,}0 \pm 22{,}3$	0,084
ω^{max} Thorax ($^\circ \cdot \mathrm{s}^{-1}$)	$651{,}0 \pm 80{,}8$	$604{,}3 \pm 95{,}6$	0,104

TABLE 7.2 – Comparaison des paramètres cinématiques du tronc et du membre supérieur dominant. * $p < 0{,}05$; ET : écart type ; θ : angle ; θ^{max} : angle maximal ; ω^{max} : vitesse maximale de rotation longitudinale, ^{LB} : lancer de balle ; ^{ARM} : position armée ; ^{IMP} : impact.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

l'épaule à l'impact.

Nos résultats mettent en évidence que la latéralité oculo-manuelle n'a pas d'effet sur la performance au service puisqu'une vitesse de balle similaire a été observée entre les deux groupes, confirmant notre hypothèse initiale. Ils complètent les investigations menées par Ziagkas et al. (2017) et Mavvidis et al. (2018), ayant montré que la latéralité oculo-manuelle n'affecte pas la réussite du 1er service ni le nombre de doubles fautes chez des joueurs professionnels et amateurs. Ils confirment aussi les résultats de travaux portant sur d'autres sports, tels que le baseball ou le cricket, n'ayant rapporté aucune différence significative de performance entre des joueurs « homogènes » et « croisés » (Classe et al., 1996 ; Laby & Kirschen, 2011 ; Thomas et al., 2005).

Selon la littérature, la position latérale de l'impact balle–raquette pour des services à plat se situe en moyenne 12 à 34 cm sur le côté non-dominant du bout du pied avant au moment de la position armée (J. Chow et al., 2003 ; Fett et al., 2021 ; Reid, Whiteside & Elliott, 2010 ; Reid et al., 2011 ; Vacek et al., 2023 ; Whiteside et al., 2013b). Les valeurs obtenues dans notre étude sont comparables à la littérature, mais diffèrent selon la latéralité oculo-manuelle puisque les joueurs « homogènes » présentent en moyenne un point d'impact ($-0,12 \pm 0,17$ m) situé significativement moins à gauche que celui des joueurs « croisés » ($-0,26 \pm 0,15$ m). Notre résultat confirme l'hypothèse formulée par Dorochenko (2013), selon laquelle les « croisés » auraient tendance à frapper la balle davantage sur leur gauche que les « homogènes ». Par conséquent, le type de latéralité oculo-manuelle semble contraindre la position latérale d'impact au service et pourrait donc être considérée comme une contrainte « organismique » au sens de la théorie dynamique du contrôle moteur. Dans la mesure où l'œil dominant traiterait l'information visuelle plus rapidement que l'œil non dominant (Coren, 1999), il est possible que les joueurs « croisés » (droitiers avec un œil directeur gauche) lancent et frappent la balle plus à gauche que les « homogènes » (droitiers avec un œil directeur droit) pour aligner verticalement la future position d'impact avec leur œil directeur. Ce positionnement pourrait faciliter la visée et le traitement des informations liées au lancer de balle à l'approche de l'impact et ainsi optimiser le contact entre la balle et la raquette.

Il existe des différences cinématiques entre les deux groupes au moment de l'IMP concernant les angles de rotation longitudinale des hanches et des épaules, l'inclinaison latérale des épaules et l'extension du coude. Ces résultats pourraient être causés par la différence de position latérale d'impact entre « croisés » et « homogènes ». Ils peuvent être compris à travers la théorie écologique de la perception et les travaux portant sur

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

l'interaction entre perception et contrôle moteur (Davids et al., 2008 ; Gibson, 1977 ; Ranganathan & Newell, 2008), selon lesquelles la qualité et la nature des informations perçues influencent directement et de façon continue le mouvement. D'après le concept de couplage perception–action, nos perceptions orientent nos actions, et nos actions influencent en retour ce que nous percevons, dans une relation réciproque et indissociable (Gibson, 1977). Ce que l'on perçoit correspond ainsi à des opportunités d'agir ou plus précisément des « affordances » guidant notre comportement moteur. Dans le cadre du service au tennis, nos résultats peuvent amener à considérer la trajectoire du lancer et plus précisément la future position latérale d'impact comme une « affordance » qui va orienter la cinématique du corps à l'impact. En effet, il apparait logique qu'un point d'impact plus ou moins décalé à gauche exige des ajustements posturaux au niveau du tronc et des membres supérieurs pour placer la raquette tenue par la main dominante sur la bonne trajectoire. Plus précisément, pour frapper la balle plus à gauche que les « homogènes », il est probable que les joueurs « croisés » accentuent l'inclinaison latérale de la ligne des épaules et utilisent davantage l'extension de leur coude à l'impact afin de « gagner en allonge ». Ils ont aussi tendance à augmenter l'abduction de l'épaule et l'inclinaison latérale de leurs hanches et à limiter la rotation longitudinale du tronc par rapport aux joueurs « homogènes ». Nos observations rejoignent les différences cinématiques rapportées entre première balle à plat et seconde balle liftée au service. En seconde balle liftée, le point d'impact des droitiers est généralement plus à gauche, et celui des gauchers plus à droite, que lors du premier service à plat (J. Chow et al., 2003) impliquant des différences d'organisation motrice principalement assurées par des changements d'orientation du tronc à l'impact (Murata & Fujii, 2022 ; Vorobiev et al., 1993).

Sur le plan angulaire, si la latéralité oculo-manuelle contraint la position latérale d'impact et influence l'orientation du corps à la frappe, elle n'influence pas la rotation longitudinale des épaules et des hanches au début du service puisque les résultats sont similaires entre les deux groupes. Il est possible qu'aux moments-clés de LB et d'ARM, la position latérale de la balle soit encore relativement proche entre les deux groupes et n'ait donc pas encore de répercussions significatives au niveau des angles de rotation longitudinale des hanches et des épaules.

Ces résultats présentent plusieurs implications pratiques. En tant que concepteur d'apprentissage, il semble essentiel pour l'entraîneur d'identifier le profil oculo-manuel de chaque joueur et d'en tenir compte dans les contenus d'entraînement. En effet, nos résultats nous invitent à considérer la latéralité oculo-manuelle comme une contrainte

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

« organismique » au sens de la théorie dynamique du contrôle moteur (Seifert & Davids, 2017), car elle influence la position latérale d'impact au service. De son côté, la position latérale d'impact peut être appréhendée comme une « affordance » dans le cadre de la théorie écologique de la perception et du couplage perception–action, c'est-à-dire une invitation ou une opportunité d'action influençant la motricité du joueur (Otte et al., 2021). Ainsi, pour un joueur droitier avec une latéralité oculo-manuelle « homogène » (œil dominant droit), l'entraineur pourrait tolérer un point d'impact légèrement moins à gauche et privilégier un travail spécifique sur la rotation longitudinale du tronc, notamment via une accélération du pelvis, afin d'atteindre une position du tronc plus frontale au moment de l'impact. À l'inverse, pour un profil droitier et « croisé », il serait recommandé de viser une position d'impact plus à gauche, mettre l'accent sur l'inclinaison latérale des épaules, et limiter la rotation longitudinale du tronc à l'approche de l'impact.

Concernant les limites de cette étude, le protocole a été conduit chez les joueurs droitiers dans la diagonale des égalités et chez les gauchers dans la diagonale des avantages. Pourtant, l'influence de la latéralité oculo-manuelle semble différer en fonction de la diagonale. Les joueurs « croisés » ont tendance à être plus précis dans la diagonale des égalités (Ziagkas et al., 2017). De plus, des différences significatives de position latérale de l'impact ont été rapportées entre les deux diagonales ($-30,0 \pm 24{,}1$ cm côté des égalités *vs.* $-10,3 \pm 23{,}3$ cm côté des avantages) (Fett et al., 2021 ; Reid et al., 2011). Cela limite donc la portée des conclusions de cette étude à la seule diagonale des égalités pour les droitiers et à la diagonale des avantages pour les gauchers.

En termes de perspectives, il serait donc intéressant d'étudier l'autre diagonale et d'intégrer des mesures de précision de la zone atteinte dans le carré de service adverse en complément de la vitesse de balle. Il pourrait également être intéressant de mettre en place une étude expérimentale évaluant la performance au service (vitesse, précision, pourcentage de réussite) en fonction de consignes verbales portant sur le lancer de balle, adaptées ou non au profil de latéralité oculo-manuelle, tout en recueillant le ressenti des joueurs sur leur perception du lancer de balle et la qualité de leurs repères visuels. Une telle approche permettrait de relier directement les résultats scientifiques aux applications pratiques sur le terrain.

7.1.5 Conclusion

Cette étude est la première à montrer que les joueurs avec une latéralité oculo-manuelle « homogène » et ceux avec une latéralité oculo-manuelle « croisée » atteignent une per-

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

formance similaire en termes de vitesse de balle. En revanche, des différences apparaissent au niveau de la position latérale de l'impact, entraînant des ajustements spécifiques de l'orientation du tronc dans les plans transverse et frontal et de l'extension du coude à ce moment-là. Les résultats montrent que les joueurs experts adaptent la cinématique du haut de leur corps à la position latérale d'impact, elle-même influencée par la latéralité oculo-manuelle. Dans cette optique, les entraîneurs sont encouragés à ne pas imposer un point d'impact identique pour tous les joueurs, mais à prendre en compte le profil de latéralité oculo-manuelle de chacun. Nos résultats peuvent les aider à concevoir des stratégies d'entraînement individualisées, en ajustant de manière cohérente les paramètres cinématiques propres à chaque type de latéralité.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Chapitre 8

Discussion et conclusion générale

8.1 Résumé des principaux résultats

Cette thèse s'est consacrée à l'étude de la variabilité inter-individuelle et à l'identification des stratégies motrices mises en œuvre par les joueurs de tennis experts lors de l'exécution du 1er service au tennis. A notre connaissance, il s'agit des premiers travaux à aborder conjointement ces différents aspects au niveau des trajectoires du CoM, des actions de flexion et d'extension des genoux et des mouvements de rotation du tronc autour de l'axe longitudinal dans le contexte du tennis. Ces paramètres cinématiques ont été choisis en raison de l'absence de consensus dans la littérature quant à leur influence directe sur la performance et de leur statut de variables d'intérêt fréquemment étudiées, auxquelles les entraîneurs portent une attention particulière en pratique.

Pour chacun de ces paramètres, notre analyse s'est d'abord concentrée sur l'étude de leur variabilité inter-individuelle au cours des phases qui précèdent l'impact balle–raquette, ainsi que lors des instants clés du service. L'objectif était d'identifier les paramètres cinématiques, les phases et les instants du mouvement présentant les niveaux de variabilité les plus élevés, ou au contraire ceux étant les plus stables entre les joueurs. Le cadre de la théorie dynamique du contrôle moteur nous a permis de formuler des hypothèses quant à l'origine de cette variabilité inter-individuelle au regard des contraintes de l'organisme, de la tâche et de l'environnement.

L'identification des stratégies motrices, menée à la suite de l'étude de la variabilité inter-individuelle, avait pour objectif d'en approfondir la compréhension. Cette démarche visait à fournir aux joueurs et aux entraîneurs des éléments concrets en faveur de l'individualisation de l'entraînement, en montrant qu'il existe différentes stratégies motrices pouvant conduire à des niveaux de performance similaires, voire à des profils de performance distincts. Les résultats de cette thèse s'inscrivent ainsi dans une perspective s'éloignant d'un modèle technique idéal, unique, applicable à tous, et mettent en évidence les caractéristiques biomécaniques propres à chaque stratégie que les entraîneurs peuvent

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

identifier et intégrer dans la pratique.

L'étude 1 s'est focalisée sur la variabilité inter-individuelle de la trajectoire verticale du CoM et de la flexion–extension des genoux au cours des phases de préparation et d'accélération du service chez des joueurs de tennis professionnels. Les résultats ont montré une variabilité inter-individuelle plus importante en début de geste, c'est à dire lors des phases de préparation/flexion, comparativement aux phases d'accélération et d'extension.

Alors qu'aucun paramètre issu de la phase de préparation n'était significativement corrélé avec la performance, certains paramètres cinématiques du CoM et des genoux de la phase d'accélération se sont révélés corrélés à la hauteur d'impact. Nous avons formulé plusieurs hypothèses pour expliquer ces résultats en nous basant sur la théorie des systèmes dynamiques. La phase de préparation du service favoriserait l'expression de cinématiques variées entre les joueurs, contribuant ainsi à la variabilité inter-individuelle observée, potentiellement sous l'influence de contraintes dites « organismiques ». À l'inverse, à l'approche de l'impact pendant la phase d'accélération, les contraintes de la tâche (impact balle–raquette, franchissement du filet, zone visée ...) s'exerceraient de façon plus importante, limitant le nombre de solutions motrices possibles et tendant ainsi à homogénéiser les mouvements entre joueurs.

Dans **l'étude 2** de cette thèse, nous avons cherché à identifier les stratégies motrices sous-jacentes à la variabilité inter-individuelle observée, en utilisant une méthode de clustering appliquée aux trajectoires verticale et horizontale du CoM. Les algorithmes de clustering ont permis d'identifier deux stratégies motrices différentes se caractérisant par des paramètres cinématiques spécifiques et conduisant à des dimensions de performance différentes. La stratégie « verticale » favorise un impact balle–raquette plus haut et plus avancé et par conséquent un meilleur pourcentage de réussite, tandis que la stratégie « horizontale » est associée à une plus grande vitesse de balle. Ces écarts pourraient trouver leur origine dans les préoccupations stratégiques des joueurs (privilégier la vitesse du service ou sa réussite) et/ou leurs caractéristiques anthropométriques, lesquelles peuvent être envisagées comme des contraintes qui agissent sur le mouvement au sens de la théorie dynamique du contrôle moteur.

L'étude 3 s'est principalement intéressée à la cinématique du tronc et à l'angle de séparation entre les épaules et les hanches dans le plan transverse lors du service, ainsi qu'à leur lien avec la performance chez des joueurs experts. Dans un second temps, elle a également permis d'examiner la variabilité inter-individuelle de ces paramètres cinématiques à différents instants clés du service (LB, ARM, IMP). Les résultats n'ont montré aucune

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

corrélation significative entre la vitesse de balle et les paramètres mesurés, à savoir l'angle de séparation, les angles des épaules et des hanches et leur vitesse de rotation longitudinale maximale, et ce, à aucun des instants clés considérés. En revanche, une importante variabilité inter-individuelle a été observée, en particulier au niveau des paramètres temporels, notamment concernant les moments d'apparition des valeurs angulaires maximales (angles maximaux de rotation des hanches, des épaules et de séparation). Ces résultats invitent à reconsidérer certaines idées largement répandues dans le milieu de l'entraînement, selon lesquelles un angle de séparation important et des vitesses de rotation du tronc élevées durant la phase d'accélération constitueraient des déterminants majeurs de la performance. En effet, cette étude montre que certains joueurs de haut niveau peuvent présenter des angles de séparation relativement faibles (de l'ordre de 5 à 10°) et ne pas développer de vitesses de rotation longitudinale extrêmement élevées, tout en atteignant un haut niveau de performance.

L'étude 4 nous a permis d'approfondir ces résultats en proposant un profilage des joueurs basé sur les paramètres cinématiques de l'étude précédente qui n'étaient pas corrélés à la vitesse de balle. Ainsi, une méthode de clustering utilisant un modèle de mélange gaussien, prenant en compte à la fois les paramètres angulaires et temporels concernant la rotation longitudinale du tronc a permis d'identifier trois stratégies motrices différentes que nous avons résumées de la façon suivante : « High shoulder rotation, high separation, high rotational speeds », « Low shoulder and hip rotations, late and medium separation » et « High shoulder and hip rotations, low separation ». Aucune des stratégies motrices observées n'a été associée à une vitesse de balle ou à une hauteur d'impact significativement supérieures.

L'étude 5 visait à mieux comprendre et identifier l'origine des stratégies observées en explorant le lien entre les paramètres cinématiques du service et les capacités fonctionnelles des joueurs concernant la rotation du tronc, évaluées à l'aide de tests de terrain (STRT et SMBT). Il était supposé que les joueurs présentant les plus grandes capacités de dissociation entre les épaules et les hanches dans le plan transverse lors des tests cliniques et fonctionnels adopteraient, lors du service, une stratégie caractérisée par un angle de séparation élevé. Contrairement à cette hypothèse, l'étude n'a montré aucune corrélation entre les paramètres mesurés lors des tests et ceux observés au service. Ces résultats suggèrent que les capacités de dissociation et les amplitudes maximales de rotation du tronc dans le plan transverse ne constituent pas, à elles seules, des contraintes « organismiques » déterminantes pour la cinématique du tronc au service. En ce sens, cette étude nous invite

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

à approfondir l'exploration des déterminants de la variabilité inter-individuelle observée et à considérer d'autres facteurs et contraintes susceptibles d'influencer l'émergence des stratégies motrices.

Enfin, l'approche utilisée dans la dernière étude de cette thèse était différente des précédentes. **L'étude 6** s'est intéressée à l'influence de la latéralité oculo-manuelle sur la biomécanique du service de joueurs de tennis experts. Les résultats ont montré que la performance était similaire entre la latéralité oculo-manuelle « homogène » et « croisée ». En revanche, des différences ont été observées au niveau de la position latérale de l'impact, entraînant des ajustements spécifiques de l'orientation du tronc dans les plans transverse et frontal. Ces résultats nous invitent à considérer le type de latéralité oculo-manuelle comme une contrainte « organismique » influençant le mouvement de service. Le lancer de balle représenterait une variable offrant une opportunité ou « affordance », selon la théorie du couplage perception–action de Gibson (1977), permettant au joueur d'adapter son mouvement de manière intuitive et cohérente avec sa perception (Luyat & Regia-Corte, 2009).

8.2 Implications pratiques

Les résultats de cette thèse remettent en question certains modèles techniques classiquement présentés dans la littérature au sujet du service au tennis (Elliott, 2006 ; Kovacs & Ellenbecker, 2011b ; N. L. Myers et al., 2017), en mettant en évidence les limites de leur application lorsqu'ils sont mobilisés sans tenir compte de la variabilité inter-individuelle. Dans ce contexte, la recherche et l'application d'un « modèle idéal » universel du service apparaît peu pertinente. Plutôt que de chercher à reproduire chez tous leurs joueurs des angles articulaires spécifiques ou des instants de déclenchement strictement définis, les entraîneurs sont ainsi encouragés à dépasser la simple reproduction d'un geste et à adopter une approche plus flexible, s'inscrivant dans le cadre de la théorie des systèmes dynamiques (Stoszkowski & Collins, 2016). En effet, il apparaît plus pertinent de tenir compte et d'exploiter les caractéristiques propres à chaque joueur. Ces caractéristiques, qualifiées de contraintes « organismiques », regroupent notamment les paramètres anthropométriques, la latéralité, l'œil directeur, la composition corporelle, l'architecture musculaire, les qualités physiques et les préférences motrices. La prise en compte de ces contraintes complexifie certes la démarche de l'entraîneur, mais elle permet de proposer des consignes plus individualisées et de favoriser un meilleur apprentissage (Renshaw & Chow, 2019).

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Les résultats des études 2 et 4 ont mis en évidence l'existence de plusieurs stratégies motrices concernant les mouvements du CoM et des genoux dans le plan sagittal et les rotations du tronc dans le plan transverse. Ces stratégies ne doivent en aucun cas être envisagées comme des modèles « rigides » ou des catégories dans lesquelles il conviendrait de classer absolument tous les joueurs, mais plutôt comme des repères situés sur un continuum. Leur principal intérêt réside dans la compréhension des mécanismes sous-jacents et des variables qui interagissent pour caractériser une stratégie donnée et en faciliter l'identification.

Nous avons également proposé, au travers de ces études, une démarche visant à identifier des stratégies motrices sur la base de paramètres cinématiques spécifiques. Cette démarche ne se veut pas analytique, mais s'inscrit au contraire dans une approche globale du geste, et doit s'accompagner systématiquement de mesures de performance et de la prise en compte des sensations et des ressentis des joueurs. Dans cette optique, une alternative pertinente aux approches prescriptives traditionnelles consiste pour les entraîneurs à accompagner les joueurs dans l'exploration de différentes stratégies, afin qu'ils puissent identifier celles qui s'accordent le mieux avec leurs ressentis, tout en s'appuyant sur des évaluations comparatives de la performance (Reid et al., 2007).

8.3 Limites de la thèse

Cette thèse présente plusieurs limites méthodologiques qu'il convient de souligner. Dans les études 1 et 3, la variabilité inter-individuelle a été quantifiée à l'aide du coefficient de variation. Or, ce dernier peut être sensible aux valeurs proches de zéro et dépend de la nature de la variable mesurée et de son mode de calcul, ce qui peut en limiter l'interprétation. Dans un second temps, nous avons eu recours à des méthodes de clustering pour identifier d'éventuelles stratégies motrices dans les études 2 et 4. Toutefois, ces approches présentent elles-mêmes certaines limites concernant notamment le choix des paramètres d'entrée, susceptible d'influencer la structure de la classification obtenue. Malgré l'utilisation de critères bayésiens pour sélectionner le modèle le mieux adapté aux données, ces méthodes restent limitées dans leur capacité à fournir une interprétation totalement robuste, en particulier dans le contexte d'une taille d'échantillon inférieure à 50 sujets, généralement considérée comme faible pour ce type d'approche.

Notre travail s'est concentré sur une population restreinte de joueurs de tennis experts, sélectionnés sur la base de critères de performance (par exemple, une vitesse de balle

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

supérieure à 160 $km \cdot h^{-1}$ ou un classement ATP). Si ce choix a permis d'étudier les stratégies motrices utilisées à haut niveau, il soulève néanmoins plusieurs questions. La transférabilité des résultats vers des niveaux de pratique inférieurs reste incertaine. De plus, des joueurs plus jeunes ou moins expérimentés pourraient présenter une variabilité inter-individuelle différente, davantage liée à des processus d'apprentissage en cours ou à une maîtrise technique incomplète, pouvant aboutir à d'autres stratégies motrices.

Dans cette thèse, si les contraintes de l'environnement et de la tâche de service ont été globalement contrôlées par la situation de laboratoire, l'origine précise de la variabilité inter-individuelle observée n'a pas été complètement déterminée. L'interprétation de nos résultats s'est principalement appuyée sur des hypothèses relatives aux contraintes « organismiques ». En plus des paramètres anthropométriques et des capacités structurelles et fonctionnelles de dissociation hanches/épaules, d'autres contraintes « organismiques » explicatives auraient mérité d'être étudiées. Pour expliquer la variabilité et les stratégies motrices identifiées dans les études 1 et 2, un profilage force-vitesse via l'analyse du counter-mouvement jump et du squat jump aurait été intéressant. Par ailleurs, une évaluation des préférences motrices abordant les modes de contraction préférentiels et les profils « aérien » ou « terrien » via l'analyse de la foulée selon les méthodes décrites dans la littérature (Gindre et al., 2015 ; Lussiana et al., 2017 ; Patoz et al., 2020) aurait peut-être permis de mieux éclairer nos résultats.

Enfin, bien que de nombreux facteurs susceptibles d'influencer la variabilité inter-individuelle aient été contrôlés tels que le niveau de pratique ou le sexe, certains ne l'ont pas été de manière exhaustive. Par exemple, la latéralité manuelle n'a pas été contrôlée dans les études 1 à 5, des joueurs droitiers et gauchers ont participé aux expérimentations. Par ailleurs, la technique d'appuis utilisée au service n'a pas été standardisée dans les études 3, 4 et 5. Même si l'influence de ce facteur semble être relativement limitée sur la cinématique du tronc, son contrôle aurait néanmoins permis de réduire une source supplémentaire de variabilité.

8.4 Perspectives de la thèse

Pour conclure, les travaux menés dans cette thèse ouvrent la voie à plusieurs perspectives de recherche. Nos résultats ont permis de remettre en question le modèle « idéal » de service au tennis en montrant l'existence d'une variabilité inter-individuelle et de stratégies motrices différentes chez les joueurs de tennis experts. Ces éléments constituent un

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

support pertinent pour l'individualisation de l'entraînement et des consignes techniques. Toutefois, l'origine précise de cette variabilité reste à préciser.

Dans la continuité des études 1 et 2, il serait intéressant d'identifier les facteurs responsables de la variabilité inter-individuelle observée durant la phase de préparation et d'examiner le rôle des préférences motrices ou des modes de contraction préférentiels et de leur influence potentielle dans chacune des stratégies dites « verticale » et « horizontale » identifiées. Ce lien, déjà documenté dans le domaine de la course à pied, mériterait d'être exploré dans le contexte du service au tennis.

Dans le prolongement des études 3, 4 et 5, une autre perspective consisterait à mieux comprendre les déterminants des stratégies motrices associées aux rotations du tronc et à la dissociation hanches/épaules en s'appuyant sur d'autres tests ou d'autres gestes sportifs proches du service au tennis.

Afin de prolonger ce travail, il serait intéressant de mener des études expérimentales visant à évaluer l'effet de consignes individualisées spécifiques aux stratégies motrices identifiées sur la cinématique du service et la performance du service. Pour les études 1 et 2, il serait envisageable de proposer des consignes adaptées aux stratégies « horizontale » ou « verticale » : par exemple, une flexion plus importante et plus rapide pour la stratégie « verticale », ou à l'inverse, une flexion moins importante avec une propulsion plus marquée vers l'avant pour la stratégie « horizontale ». Il serait également intéressant de mesurer les forces de réaction du sol. Pour donner suite aux études 3, 4 et 5, des consignes différenciées et adaptées aux profils « dissocié » et « associé » pourraient être transmises à des groupes de serveurs afin de mesurer leurs effets sur la cinématique du tronc et sur la performance. Enfin, dans la suite de l'étude 6, il serait intéressant d'examiner l'impact de consignes ciblant la trajectoire du lancer de balle et la position latérale d'impact, en fonction du type de latéralité oculo-manuelle, et de déterminer si ces ajustements peuvent améliorer la performance.

Une autre perspective importante serait d'élargir et de compléter l'étude de la variabilité inter-individuelle à des joueurs de niveaux différents. Il s'agirait, dans un premier temps, d'examiner si le degré de cette variabilité varie en fonction du niveau de pratique, puis, dans un second temps, d'identifier les solutions motrices existantes chez les joueurs novices et intermédiaires afin de les confronter à celles des experts.

Enfin, de futures études pourraient approfondir le rôle des contraintes autres qu'« organismiques », notamment celles liées à l'environnement (conditions de pratique extérieure avec du vent par exemple) ou à la tâche (diagonale de service, zones visées, effets transmis

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

à la balle, etc.). Ces études contribueraient à mieux comprendre leur influence sur le geste du service et permettraient d'enrichir l'interprétation théorique de cette thèse, tout en reprenant le cadre de la théorie dynamique du contrôle moteur pour l'étude des habiletés motrices complexes.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

BIBLIOGRAPHIE

Abrams, G. D., Harris, A. H., Andriacchi, T. P., & Safran, M. R., (2014), Biomechanical analysis of three tennis serve types using a markerless system, *British Journal of Sports Medicine*, *48 4*, 339-342, https://doi.org/10.1136/bjsports-2012-091371

Adams, J. A., (1971), A Closed-Loop Theory of Motor Learning, *Journal of Motor Behavior*, *3 2*, 111-150, https://doi.org/10.1080/00222895.1971.10734898

Ae, M., (2020), The next steps for expanding and developing sport biomechanics, *Sports Biomechanics*, *19 6*, 701-722, https://doi.org/10.1080/14763141.2020.1743745

Anderson, E., Stone, J. A., Dunn, M., & Heller, B., (2021), Coach approaches to practice design in performance tennis, *International Journal of Sports Science & Coaching*, *16 6*, 1281-1292, https://doi.org/10.1177/17479541211027294

Anderson, M. B., (1979), Comparison of Muscle Patterning in the Overarm Throw and Tennis Serve, *Research Quarterly. American Alliance for Health, Physical Education, Recreation and Dance*, *50 4*, 541-553, https://doi.org/10.1080/00345377.1979.10615649

Annett, M., (2004), Hand preference observed in large healthy samples : Classification, norms and interpretations of increased non-right-handedness by the right shift theory, *British Journal of Psychology*, *95 3*, 339-353, https://doi.org/10.1348/0007126041528130

Antúnez, R. M., Hernández, F. J. M., García, J. P. F., Vaíllo, R. R., & Arroyo, J. S. D., (2012), Relationship between motor variability, accuracy, and ball speed in the tennis serve, *Journal of Human Kinetics*, *33*, 45-53, https://doi.org/10.2478/v10078-012-0043-3

Azémar, G., Stein, J.-F., & Ripoll, H., (2008), Effets de la dominance oculaire sur la coordination œil–main dans les duels sportifs, *Science & Sports*, *23 6*, 263-277, https://doi.org/10.1016/j.scispo.2008.06.004

Bačić, B., & Ghazala, A., (2024), *Left-Handed Representation in Top 100 Male Professional Tennis Players : Multi-disciplinary Perspectives* (1). https://doi.org/10.48550/ARXIV.2412.20360

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Bahamonde, R. E., & Knudson, D., (2001), Ground reaction forces of two types of stances and tennis serves, *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *33 5*, S102, https://doi.org/10.1097/00005768-200105001-00575

Bahamonde, R. E., (2000), Changes in angular momentum during the tennis serve, *Journal of Sports Sciences*, *18 8*, 579-592, https://doi.org/10.1080/02640410050082297

Baiget, E., Corbi, F., Fuentes, J. P., & Fernández-Fernández, J., (2016), The Relationship Between Maximum Isometric Strength and Ball Velocity in the Tennis Serve, *Journal of Human Kinetics*, *53*, 63-71, https://doi.org/10.1515/hukin-2016-0028

Baiget, E., Corbi, F., & López, J., (2022), Influence of Anthropometric, Ball Impact and Landing Location Parameters on Serve Velocity in Elite Tennis Competition, *Biology of Sport*, *40*, 273-281, https://doi.org/10.5114/biolsport.2023.112095

Balasubramaniam, R., Riley, M. A., & Turvey, M., (2000), Specificity of postural sway to the demands of a precision task, *Gait & Posture*, *11 1*, 12-24, https://doi.org/10.1016/S0966-6362(99)00051-X

Bańkosz, Z., & Winiarski, S., (2020), Kinematic Parameters of Topspin Forehand in Table Tennis and Their Inter- and Intra-Individual Variability, *Journal of Sports Science & Medicine*, *19 1*, 138-148, Récupérée mai 15, 2023, à partir de https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7039029/

Bartlett, R., Wheat, J., & Robins, M., (2007), Is movement variability important for sports biomechanists ?, *Sports Biomechanics*, *6 2*, 224-243, https://doi.org/10.1080/14763140701322994

Bernstein, N. A., (1967), *The Co-Ordination and Regulation of Movements*, Pergamon Press Ltd.

Bertsch, J., (1995), Les Vertus de la Répétition. In *Apprentissages moteurs et conditions d'apprentissages* (p. 51-66), Presses Universitaires de France.

Bideault, G., Herault, R., & Seifert, L., (2013), Data modelling reveals inter-individual variability of front crawl swimming, *Journal of Science and Medicine in Sport*, *16 3*, 281-285, https://doi.org/10.1016/j.jsams.2012.08.001

Bonato, M., Maggioni, M., Rossi, C., Rampichini, S., La Torre, A., & Merati, G., (2014), Relationship between Anthropometric or Functional Characteristics and Maximal Serve Velocity in Professional Tennis Players, *The Journal of sports medicine and physical fitness*, *55*.

Bonnefoy, A., Slawinski, J., Leveque, J., Riquet, A., & Miller, C., (2009), Relationship between the vertical racquet head height and the lower limb motions of elite players'

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

flat serve, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, *12*, 55-57, https://doi.org/10.1080/10255840903065522

Bourassa, D., (1996), Handedness and Eye-dominance : A Meta-analysis of Their Relationship, *Laterality*, *1 1*, 5-34, https://doi.org/10.1080/713754206

Bouveyron, C., & Jacques, J., (2017), *R Package funHDDC : Functional High-Dimensional Data Clustering* (Version Version 2.3.1), https://CRAN.R-project.org/package=funHDDC

Bozděch, M., Puda, D., & Grasgruber, P., (2024), A detailed analysis of game statistics of professional tennis players : An inferential and machine learning approach (Q. Zhang, Éd.), *PLOS ONE*, *1911*, e0309085, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0309085

Brisson, T. A., & Alain, C., (1996), Should Common Optimal Movement Patterns be Identified as the Criterion to be Achieved ?, *Journal of Motor Behavior*, *28 3*, 211-223, https://doi.org/10.1080/00222895.1996.9941746

Brito, A. V., Fonseca, P., Costa, M. J., Cardoso, R., Santos, C. C., Fernandez-Fernandez, J., & Fernandes, R. J., (2024), The Influence of Kinematics on Tennis Serve Speed : An In-Depth Analysis Using Xsens MVN Biomech Link Technology, *Bioengineering*, *11 10*, 971, https://doi.org/10.3390/bioengineering11100971

Brody, H., (2006), Unforced errors and error reduction in tennis, *British Journal of Sports Medicine*, *40 5*, 397-400, https://doi.org/10.1136/bjsm.2005.023432

Brown, E. G., (2021), A faster serve has more impact on success for female elite tennis players than males, *International Journal of Performance Analysis in Sport*, *21 4*, 600-610, https://doi.org/10.1080/24748668.2021.1931777

Bullock, G. S., Strahm, J., Hulburt, T. C., Beck, E. C., Waterman, B. R., & Nicholson, K. F., (2020), The Relationship of Range of Motion, Hip Shoulder Separation, and Pitching Kinematics, *International Journal of Sports Physical Therapy*, *15 6*, 1119-1128, https://doi.org/10.26603/ijspt20201119

Campbell, A., Straker, L., O'Sullivan, P., Elliott, B., & Reid, M., (2013), Lumbar Loading in the Elite Adolescent Tennis Serve : Link to Low Back Pain, *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *45 8*, 1562-1568, https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31828bea5e

Carboch, J., & Kočíb, T., (2016), A comparison of service efficiency between players of male and female doubles at professional tennis tournaments, *AUC KINANTHROPOLOGICA*, *51 2*, 56-62, https://doi.org/10.14712/23366052.2015.32

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Carboch, J., Tufano, J. J., & Süss, V., (2018), Ball toss kinematics of different service types in professional tennis players, *International Journal of Performance Analysis in Sport*, *18 6*, 881-891, https://doi.org/10.1080/24748668.2018.1519750

Cassirame, J., Eustache, E., Sanchez, H., Czingon, H., Collet, P., Homo, S., Theodorou, A., Panoutsakopoulos, V., Bayne, H., & Frère, J., (2024), Clustering technical approaches of elite and world-class pole vaulters based on 10 years of measurement during competitions, *Journal of Sports Sciences*, *42 11*, 971-980, https://doi.org/10.1080/02640414.2024.2372940

Castañer, M., Andueza, J., Hileno, R., Puigarnau, S., Prat, Q., & Camerino, O., (2018), Profiles of Motor Laterality in Young Athletes' Performance of Complex Movements : Merging the MOTORLAT and PATHoops Tools, *Frontiers in Psychology*, *9*, https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00916

Ceyte, H., Lion, A., Caudron, S., Perrin, P., & Gauchard, G. C., (2017), Visuo-oculomotor skills related to the visual demands of sporting environments, *Experimental Brain Research*, *235 1*, 269-277, https://doi.org/10.1007/s00221-016-4793-3

Chow, J. Y., Davids, K., Hristovski, R., Araújo, D., & Passos, P., (2011), Nonlinear pedagogy : Learning design for self-organizing neurobiological systems, *New Ideas in Psychology*, *29 2*, 189-200, https://doi.org/10.1016/j.newideapsych.2010.10.001

Chow, J., Carlton, L., Lim, Y.-T., Chae, W.-S., Shim, J.-H., Kuenster, A., & 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, https://doi.org/10.1080/0264041031000101908

Chow, J., Park, S.-A., & Tillman, M. D., (2009), Lower trunk kinematics and muscle activity during different types of tennis serves, *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, *1 1*, 24, https://doi.org/10.1186/1758-2555-1-24

Chu, Y., Fleisig, G. S., Simpson, K. J., & Andrews, J. R., (2009), Biomechanical Comparison between Elite Female and Male Baseball Pitchers, *Journal of Applied Biomechanics*, *25 1*, 22-31, https://doi.org/10.1123/jab.25.1.22

Classe, J. G., Daum, K., Semes, L., Wisniewski, J., Rutstein, R., Alexander, L., Beisel, J., Mann, K., Nawakowski, R., Smith, M., & Bartolucci, A., (1996), Association between eye and hand dominance and hitting, fielding and pitching skill among players of the Southern Baseball League, *Journal of the American Optometric Association*, *67 2*, 81-86.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Cohen, D. B., Mont, M. A., Campbell, K. R., Vogelstein, B. N., & Loewy, J. W., (1994), Upper extremity physical factors affecting tennis serve velocity, *The American Journal of Sports Medicine*, *22 6*, 746-750, https : / / doi . org / 10 . 1177 / 036354659402200604

Colomar, J., Baiget, E., & Corbi, F., (2020), Influence of Strength, Power, and Muscular Stiffness on Stroke Velocity in Junior Tennis Players, *Frontiers in Physiology*, *11*, 196, https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00196

Colomar, J., Corbi, F., & Baiget, E., (2022), Improving Tennis Serve Velocity : Review of Training Methods and Recommendations, *Strength & Conditioning Journal*, *Publish Ahead of Print*, https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000733

Colomar, J., Corbi, F., Brich, Q., & Baiget, E., (2022), Determinant Physical Factors of Tennis Serve Velocity : A Brief Review, *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *17 8*, 1159-1169, https://doi.org/10.1123/ijspp.2022-0091

Connolly, M., Middleton, K., Spence, G., Cant, O., & Reid, M., (2021), Effects of Lumbar Spine Abnormality and Serve Types on Lumbar Kinematics in Elite Adolescent Tennis Players, *Sports Medicine - Open*, *7 1*, 7, https://doi.org/10.1186/s40798-020-00295-2

Connolly, M., Middleton Dr, K., & Reid, M., (2019), Differences in Tennis Serve Kinematics between Elite Adolescent Male and Female Players, *37(1)*, 431.

Corballis, M. C., (2009), The evolution and genetics of cerebral asymmetry, *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, *364 1519*, 867-879, https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0232

Cordova, M., (2016), Social Media, Learning, Networking and Promotion Opportunities for Tennis Coaches, *ITF Coaching & Sport Science Review*, *24 68*, 6-8, https://doi.org/10.52383/itfcoaching.v24i68.170

Coren, S., & Kaplan, C. P., (1973), Patterns of ocular dominance, *American Journal of Optometry and Archives of American Academy of Optometry*, *50 4*, 283-292.

Coren, S., (1999), Sensorimotor Performance as a Function of Eye Dominance and Handedness, *Perceptual and Motor Skills*, *88 2*, 424-426, https://doi.org/10.2466/pms.1999.88.2.424

Cormie, P., McGuigan, M. R., & Newton, R. U., (2011), Developing Maximal Neuromuscular Power : Part 1 – Biological Basis of Maximal Power Production, *Sports Medicine*, *41 1*, 17-38, https://doi.org/10.2165/11537690-000000000-00000

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Cowin, J., Nimphius, S., Fell, J., Culhane, P., & Schmidt, M., (2022), A Proposed Framework to Describe Movement Variability within Sporting Tasks : A Scoping Review, *Sports Medicine - Open*, *81*, 85, https://doi.org/10.1186/s40798-022-00473-4

Craven, P., & Wahba, G., (1979), Smoothing noisy data with spline functions, *Numerical Mathematics*, *314*, 377-403.

Crespo, M., (2009), Tennis Coaching in the Era of Dynamic Systems, *Journal of Medicine and Science in Tennis*, *142*, 20-25.

Cusumano, J. P., & Cesari, P., (2006), Body-goal Variability Mapping in an Aiming Task, *Biological Cybernetics*, *945*, 367-379, https://doi.org/10.1007/s00422-006-0052-1

Davids, K., Button, C., & Bennett, S., (2008), *Dynamics of skill acquisition : a constraints-led approach*, Human Kinetics.

Davids, K., Glazier, P., Ara ? ?jo, D., & Bartlett, R., (2003), Movement Systems as Dynamical Systems : The Functional Role of Variability and its Implications for Sports Medicine, *Sports Medicine*, *334*, 245-260, https://doi.org/10.2165/00007256-200333040-00001

De Leva, P., (1996), Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters, *Journal of Biomechanics*, *299*, 1223-1230, https://doi.org/10.1016/0021-9290(95)00178-6

De Subijana, C., & Navarro, E., (2010), Kinetic Energy Transfer during the Tennis Serve, *Biology of Sport*, *274*, 279-287, https://doi.org/10.5604/20831862.927494

Decker, L. M., Cignetti, F., Potter, J. F., Studenski, S. A., & Stergiou, N., (2012), Use of Motor Abundance in Young and Older Adults during Dual-Task Treadmill Walking (A. E. Kline, Éd.), *PLoS ONE*, *77*, e41306, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0041306

Deghaies, K., Lussiana, T., Touzard, P., Fourel, L., Ozan, S., Brechbuhl, C., Gindre, C., Bideau, B., & Martin, C., (2025), Tennis Serve Constraints Delimit but Do Not Prohibit Individual Movement Strategies among Professional Players, *Journal of Human Kinetics*, https://doi.org/10.5114/jhk/203795

Deghaies, K., Lussiana, T., Touzard, P., Fourel, L., Ozan, S., Gindre, C., Bideau, B., & Martin, C., (2024), Inter-Individual Variability in Knee Kinematics During the Tennis Serve, *ISBS Proceedings Archive*, *421*, https://commons.nmu.edu/isbs/vol42/iss1/211/

Delignières, D., Nourrit, D., Lauriot, B., & Cadjee, I., (1997), L'acquisition Des Habiletés Motrices Complexes, *Science & Motricité*, *35-36*, 82-83.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Dickinson, J., (1985), Some Perspectives on Motor Learning Theory. In *Advances in Psychology* (p. 209-237, T. 27), Elsevier, https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62538-8

Dolatabadi, E., Mansfield, A., Patterson, K. K., Taati, B., & Mihailidis, A., (2017), Mixture-Model Clustering of Pathological Gait Patterns, *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, *21 5*, 1297-1305, https://doi.org/10.1109/jbhi.2016.2633000

Dorochenko, P., (2013), *El Ojo Director* (1re éd.), Paul Dorochenko, https://www.amazon.es/dp/B00E41NVGG

Dossena, F., Rossi, C., LA Torre, A., & Bonato, M., (2016), The role of lower limbs during tennis serve, *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, *58 3*, 210-215, https://doi.org/10.23736/S0022-4707.16.06685-8

Duboy, J., Junqua, A., & Lacouture, P., (1994), *Mécanique humaine : éléments d'une analyse des gestes sportifs en deux dimensions*, Revue E.P.S.,
OCLC : 1132459658.

Durand, A. C., & Gould, G. M., (1910), A method of determining ocular dominance, *Journal of the American Medical Association*, *55 5*, 369, https://doi.org/10.1001/jama.1910.04330050007004

Ellenbecker, T. S., & Roetert, E. P., (2004), An Isokinetic Profile of Trunk Rotation Strength in Elite Tennis Players : *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *36 11*, 1959-1963, https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000145469.08559.0E

Elliott, B., (2006), Biomechanics and tennis, *British Journal of Sports Medicine*, *40 5*, 392-396, https://doi.org/10.1136/bjsm.2005.023150

Elliott, B., Fleisig, G., Nicholls, R., & Escamilia, R., (2003), Technique effects on upper limb loading in the tennis serve, *Journal of Science and Medicine in Sport*, *6 1*, 76-87, https://doi.org/10.1016/s1440-2440(03)80011-7

Elliott, B., Reid, M., & Crespo, M. (Éd.), (2003), *Biomechanics of Advanced Tennis Coaching*, International Tennis Federation.

Elliott, B., Reid, M., & Crespo, M., (2009), *Technique Development in Tennis Stroke Production* (2nd ed), International Tennis Federation.

Elliott, B., Marsh, T., & Blanksby, B., (1986), A Three-Dimensional Cinematographic Analysis of the Tennis Serve, *International Journal of Sport Biomechanics*, *2 4*, 260-271, https://doi.org/10.1123/ijsb.2.4.260

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Elliott, B., Marshall, R. N., & Noffal, G. J., (1995), Contributions of Upper Limb Segment Rotations during the Power Serve in Tennis, *Journal of Applied Biomechanics*, *11 4*, 433-442, https://doi.org/10.1123/jab.11.4.433

Elliott, B., Whiteside, D., Lay, B., & Reid, M., (2013), The Female Tennis Serve : An Analogous Version of the Male Serve ?, *Proceedings of the 31st International Conference on Biomechanics in Sports*.

Elliott, B., & Wood, G., (1983), The Biomechanics of the Foot-up and Foot-Back Tennis Service Techniques, *The Australian Journal of Sport Sciences*, *3 2*, 3-6.

Erickson, G. B., (2007), *Sports Vision : Vision Care for the Enhancement of Sports Performance*, Elsevier.

Ericsson, K. A., & Pool, R., (2016), *Peak : secrets from the new science of expertise*, Houghton Mifflin Harcourt.

Fadier, M., Martin, C., & Touzard, P., (2021), Analyse cinématique préliminaire du service chez des enfants de 10 ans et moins, *ITF Coaching & Sport Science Review*, *29 85*, 12-14, https://doi.org/10.52383/itfcoaching.v29i85.275

Famose, J. P., (1998), *Tâches Motrices et Stratégies Pédagogiques* [thèse de doct., Universidade da Coruña].

Fédération Française de Tennis, (2021, décembre), *Un programme d'excellence pour préparer Paris 2024*, FFT – Direction Technique Nationale. https://www.fft.fr/actualites/un-programme-dexcellence-pour-preparer-paris-2024

Fernandez-Fernandez, J., Nakamura, F. Y., Moreno-Perez, V., Lopez-Valenciano, A., Del Coso, J., Gallo-Salazar, C., Barbado, D., Ruiz-Perez, I., & Sanz-Rivas, D., (2019), Age and sex-related upper body performance differences in competitive young tennis players (D. Boullosa, Éd.), *PLOS ONE*, *14 9*, e0221761, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221761

Fernandez-Fernandez, J., Ulbricht, A., & Ferrauti, A., (2014), Fitness testing of tennis players : How valuable is it ?, *British Journal of Sports Medicine*, *48*, i22-i31, https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-093152

Fernández-García, Á. I., Blanca-Torres, J. C., Nikolaidis, P. T., & Torres-Luque, G., (2019), Differences in competition statistics between winners and losers in male and female tennis players in Olympic Games, *German Journal of Exercise and Sport Research*, *49 3*, 313-318, https://doi.org/10.1007/s12662-019-00608-y

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Fetisova, Y., (2021), *Applying the Expert Novice Paradigm in Tennis Coaching : Improving Coaches' Knowledge, Diagnostic Skills and Understanding of the Tennis Serve Technique* [thèse de doct., Victoria University].

Fetisova, Y., Zois, J., Spittle, M., & Dawson, A., (2021), Coaches' internal model of the tennis serve technique : Knowing or understanding ?, *International Journal of Sports Science & Coaching*, *16 3*, 568-584, https://doi.org/10.1177/1747954120984879

Fett, J., Oberschelp, N., Vuong, J.-L., Wiewelhove, T., & Ferrauti, A., (2021), Kinematic characteristics of the tennis serve from the ad and deuce court service positions in elite junior players, *PLOS ONE*, *16 7*, e0252650, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252650

Fett, J., Ulbricht, A., & Ferrauti, A., (2020), Impact of Physical Performance and Anthropometric Characteristics on Serve Velocity in Elite Junior Tennis Players, *Journal of Strength and Conditioning Research*, *34 1*, 192-202, https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002641

Fitts, P. M., (1954), The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement., *Journal of Experimental Psychology*, *47 6*, 381-391, https://doi.org/10.1037/h0055392

Fitzpatrick, A., Stone, J. A., Choppin, S., & Kelley, J., (2024), Analysing Hawk-Eye ball-tracking data to explore successful serving and returning strategies at Wimbledon, *International Journal of Performance Analysis in Sport*, *24 3*, 251-268, https://doi.org/10.1080/24748668.2023.2291238

Fleisig, G., Hsu, W., Fortenbaugh, D., Cordover, A., & Press, J., (2013), Trunk axial rotation in baseball pitching and batting, *Sports Biomechanics*, *12 4*, 324-333, https://doi.org/10.1080/14763141.2013.838693

Fleisig, G., Nicholls, R., Elliott, B., & Escamilla, R., (2003), Tennis : Kinematics used by world class tennis players to produce high-velocity serves, *Sports Biomechanics*, *2 1*, 51-64, https://doi.org/10.1080/14763140308522807

Floría, P., Harrison, A. J., Rojo-Álvarez, J. L., Melgarejo-Meseguer, F. M., & Sanchez-Sixto, A., (2024), Joint movement patterns differ among male recreational runners with different running style, *Sports Biomechanics*, 1-12, https://doi.org/10.1080/14763141.2023.2298947

Forrester, S. E., & Townend, J., (2015), The effect of running velocity on footstrike angle–a curve-clustering approach, *Gait & Posture*, *41 1*, 26-32, https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.08.004

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Fourel, L., Touzard, P., Fadier, M., Arles, L., Deghaies, K., Ozan, S., & Martin, C., (2024), Relationships Between Force-Time Curve Variables and Tennis Serve Performance in Competitive Tennis Players, *Journal of Strength & Conditioning Research*, *38 9*, 1667-1674, https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004848

Fraley, C., (1998), How Many Clusters ? Which Clustering Method ? Answers Via Model-Based Cluster Analysis, *The Computer Journal*, *41 8*, 578-588, https://doi.org/10.1093/comjnl/41.8.578

Garipuy, C., & Wolff, M., (1999), Tennis : Rôle de La Latéralité Oculo-Manuelle, *Revue EPS*, 73-77.

Genevois, C., (2016), Le Lancer de Balle Au Service [magazine], *E Mag Club Fédéral Enseign., Enseignement, FFT*, 8-13.

Genevois, C., Frican, B., Creveaux, T., Hautier, C., & Rogowski, I., (2013), Effects of two training protocols on the forehand drive performance in tennis, *Journal of Strength and Conditioning Research*, *27 3*, 677-682, https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31825c3290

Giblin, G., Whiteside, D., & Reid, M., (2017), Now you see, now you don't ... the influence of visual occlusion on racket and ball kinematics in the tennis serve, *Sports Biomechanics*, *16 1*, 23-33, https://doi.org/10.1080/14763141.2016.1179337

Gibson, J. J., (1977), The Theory of Affordances, In R. Shaw & J. Bransford (Éd.), *Perceiving, Acting and Knowing : Toward an Ecological Psychology* (p. 67-82), Erlbaum.

Gillet, E., Leroy, D., Thouvarecq, R., & Stein, J.-F., (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, https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31818efe29

Gindre, C., Lussiana, T., Hebert-Losier, K., & Mourot, L., (2015), Aerial and Terrestrial Patterns : A Novel Approach to Analyzing Human Running, *International Journal of Sports Medicine*, *37 01*, 25-26, https://doi.org/10.1055/s-0035-1555931

Gindre, C., Ralph Hippolyt & Théraulaz, B., (2016), Etes-Vous Terrien Ou Aérien ? [magazine], *Sport et Vie*, *156*, 14-23.

Girard, O., Eicher, F., Micallef, J.-P., & Millet, G., (2010), Plantar pressures in the tennis serve, *Journal of Sports Sciences*, *28 8*, 873-880, https://doi.org/10.1080/02640411003792695

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Girard, O., Micallef, J.-P., & Millet, G. P., (2007), Influence of Restricted Knee Motion During the Flat First Serve in Tennis, *The Journal of Strength and Conditioning Research*, *21 3*, 950, https://doi.org/10.1519/R-20876.1

Girard, O., Micallef, J.-P., & Millet, G. P., (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.

Glazier, P. S., (2006), Measuring Coordination and Variability in Coordination, In K. Davids, S. Bennett & K. M. Newell (Éd.), *Movement System Variability* (p. 167-181), Human Kinetics.

Glazier, P. S., & Davids, K., (2009), Constraints on the Complete Optimization of Human Motion, *Sports medicine*, *39 1*, 15-28.

Glazier, P. S., & Lamb, P. F., (2017, octobre 23), Inter-and intra-individual movement variability in the golf swing, In M. Toms, S. MacKenzie, S. Robertson, M. Lochbaum, K. Kingston & A. Fradkin (Éd.), *Routledge International Handbook of Golf Science* (1re éd., p. 49-63), Routledge, https://doi.org/10.4324/9781315641782-6

Glazier, P. S., & Mehdizadeh, S., (2019), Challenging Conventional Paradigms in Applied Sports Biomechanics Research, *Sports Medicine*, *49 2*, 171-176, https://doi.org/10.1007/s40279-018-1030-1

Godwin, A., Takahara, G., Agnew, M., & Stevenson, J., (2010), Functional data analysis as a means of evaluating kinematic and kinetic waveforms, *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *11 6*, 489-503, https://doi.org/10.1080/14639220903023368

Gonjo, T., Olstad, B. H., Šťastný, J., Conceição, A., & Seifert, L., (2023), Intra- and inter-individual variability in the underwater pull-out technique in 200 m breaststroke turns (D. M. Pessôa Filho, Éd.), *PLOS ONE*, *18 3*, e0283234, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283234

González-González, I., Rodríguez-Rosell, D., Clavero-Martín, D., Mora-Custodio, R., Pareja-Blanco, F., García, J. M. Y., & González-Badillo, J. J., (2018), Reliability and Accuracy of Ball Speed During Different Strokes in Young Tennis Players, *Sports Medicine International Open*, *2 5*, E133-E141, https://doi.org/10.1055/a-0662-5375

Gordon, B. J., & Dapena, J., (2006), Contributions of joint rotations to racquet speed in the tennis serve, *Journal of Sports Sciences*, *24 1*, 31-49, https://doi.org/10.1080/02640410400022045

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Gormley, I. C., Murphy, T. B., & Raftery, A. E., (2023), Model-Based Clustering, *Annual Review of Statistics and Its Application*, *10 1*, 573-595, https://doi.org/10.1146/annurev-statistics-033121-115326

Gould, Z. I., Oliver, J. L., Lloyd, R. S., Neil, R., & Bull, M., (2021), The Golf Movement Screen Is Related to Spine Control and X-Factor of the Golf Swing in Low Handicap Golfers, *Journal of Strength & Conditioning Research*, *35 1*, 240-246, https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002664

Guess, T. M., Gray, A. D., Willis, B. W., Guess, M. M., Sherman, S. L., Chapman, D. W., & Mann, J. B., (2020), Force-Time Waveform Shape Reveals Countermovement Jump Strategies of Collegiate Athletes, *Sports*, *8 12*, 159, https://doi.org/10.3390/sports8120159

Guo, L. Y., Lin, W. Y., Tsai, Y. J., Hou, Y. Y., Chen, C. C., Yang, C. H., Huang, C. C., & Liu, Y. H., (2010), Different Limb Kinematic Patterns during Pitching Movement between Amateur and Professional Baseball Players, *Journal of Medical and Biological Engineering*, *30 3*, 177-180.

Haake, S., & Coe, A. (Éd.), (2000), *Tennis Science & Technology*, Blackwell Science.

Hagemann, N., (2009), The advantage of being left-handed in interactive sports, *Attention, Perception & Psychophysics*, *71 7*, 1641-1648, https://doi.org/10.3758/APP.71.7.1641

Handa, T., Mukuno, K., Uozato, H., Niida, T., Shoji, N., & Shimizu, K., (2004), Effects of Dominant and Nondominant Eyes in Binocular Rivalry : *Optometry and Vision Science*, *81 5*, 377-383, https://doi.org/10.1097/01.opx.0000135085.54136.65

Hanley, B., Tucker, C. B., Gallagher, L., Parelkar, P., Thomas, L., Crespo, R., & Price, R. J., (2022), Grizzlies and gazelles : Duty factor is an effective measure for categorizing running style in English Premier League soccer players, *Frontiers in Sports and Active Living*, *4*, 939676, https://doi.org/10.3389/fspor.2022.939676

Hayen, A., (2006), Clustered data in sports research, *Journal of Science and Medicine in Sport*, *9 1–2*, 165-168, https://doi.org/10.1016/j.jsams.2006.02.003

Hayes, M. J., Spits, D. R., Watts, D. G., & Kelly, V. G., (2021), Relationship Between Tennis Serve Velocity and Select Performance Measures, *Journal of Strength and Conditioning Research*, *35 1*, 190-197, https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002440

Henchoz, Y., Malatesta, D., Gremion, G., & Belli, A., (2006), Effects of the transition time between muscle-tendon stretch and shortening on mechanical efficiency, *European*

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Journal of Applied Physiology, *96 6*, 665-671, https://doi.org/10.1007/s00421-005-0124-2

Hennig, C., (2015), Clustering Strategy and Method Selection. In *Handbook of Cluster Analysis* (p. 703-730, T. 9).

Hernández-Davó, J. L., Moreno, F. J., Sanz-Rivas, D., Hernández-Davó, H., Coves, Á., & Caballero, C., (2019), Variations in kinematic variables and performance in the tennis serve according to age and skill level, *International Journal of Performance Analysis in Sport*, *19 5*, 749-762, https://doi.org/10.1080/24748668.2019.1653036

Hizan, H., Whipp, P., & 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, https://doi.org/10.1080/24748668.2011.11868556

Ho, R., Thompson, B., Babu, R. J., & Dalton, K., (2018), Sighting ocular dominance magnitude varies with test distance, *Clinical and Experimental Optometry*, *101 2*, 276-280, https://doi.org/10.1111/cxo.12627

Hodgkinson, M., (2015), *Game, Set and Match : Secret Weapons of the World's Top Tennis Players*, Bloomsbury Publishing Plc.

Holt, K. G., Hamill, J., & Andres, R. O., (1990), The force-driven harmonic oscillator as a model for human locomotion, *Human Movement Science*, *9 1*, 55-68, https://doi.org/10.1016/0167-9457(90)90035-C

Hornestam, J. F., Souza, T. R., Magalhães, F. A., Begon, M., Santos, T. R. T., & Fonseca, S. T., (2021), The Effects of Knee Flexion on Tennis Serve Performance of Intermediate Level Tennis Players, *Sensors*, *21 16*, 5254, https://doi.org/10.3390/s21165254

Hoyt, D. F., & Taylor, C. R., (1981), Gait and the energetics of locomotion in horses, *Nature*, *292 5820*, 239-240, https://doi.org/10.1038/292239a0

Ikeda, Y., Kijima, K., Kawabata, K., Fuchimoto, T., & Ito, A., (2006), Relationship between side medicine-ball throw performance and physical ability for male and female athletes, *European Journal of Applied Physiology*, *99 1*, 47-55, https://doi.org/10.1007/s00421-006-0316-4

Ikeda, Y., Miyatsuji, K., Kawabata, K., Fuchimoto, T., & Ito, A., (2009), Analysis of Trunk Muscle Activity in the Side Medicine-Ball Throw, *Journal of Strength and Conditioning Research*, *23 8*, 2231-2240, https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181b8676f

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

International Tennis Federation, (2021), *ITF Rules of Tennis 2021*, International Tennis Federation, https://www.itftennis.com/media/4421/2021-rules-of-tennis-english.pdf

International Tennis Federation, (2024), *ITF Global Tennis Report 2024*, International Tennis Federation, https://itf.uberflip.com/i/1529940

Jacques, J., & Preda, C., (2014), Functional data clustering : a survey, *Advances in Data Analysis and Classification*, *8 3*, 231-255, https://doi.org/10.1007/s11634-013-0158-y

Jacquier-Bret, J., & Gorce, P., (2024a), Kinematics of the Tennis Serve Using an Optoelectronic Motion Capture System : Are There Correlations between Joint Angles and Racket Velocity ?, *Sensors*, *24 11*, 3292, https://doi.org/10.3390/s24113292

Jacquier-Bret, J., & Gorce, P., (2024b), Kinematics Characteristics of Key Point of Interest during Tennis Serve among Tennis Players : A Systematic Review and Meta-Analysis, *Frontiers in Sports and Active Living*, *6*, 1432030, https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1432030

Jauhiainen, S., Pohl, A. J., Äyrämö, S., Kauppi, J.-P., & Ferber, R., (2020), A hierarchical cluster analysis to determine whether injured runners exhibit similar kinematic gait patterns, *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *30 4*, 732-740, https://doi.org/10.1111/sms.13624

Johnson, C. D., & McHugh, M. P., (2006), Performance demands of professional male tennis players, *British Journal of Sports Medicine*, *40 8*, 696-699, https://doi.org/10.1136/bjsm.2005.021253

Johnson, K. D., Kim, K.-M., Yu, B.-K., Saliba, S. A., & Grindstaff, T. L., (2012), Reliability of Thoracic Spine Rotation Range-of-Motion Measurements in Healthy Adults, *Journal of Athletic Training*, *47 1*, 52-60, Récupérée mars 28, 2022, à partir de https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3418115/

Kadlec, D., Miller-Dicks, M., & Nimphius, S., (2023), Training for "Worst-Case" Scenarios in Sidestepping : Unifying Strength and Conditioning and Perception–Action Approaches, *Sports Medicine - Open*, *9 1*, 22, https://doi.org/10.1186/s40798-023-00566-8

Keele, S. W., (1968), Movement control in skilled motor performance., *Psychological Bulletin*, *70*, 387-403, https://doi.org/10.1037/h0026739

Kelso, J. S., (1995), *Dynamic Patterns : The Self-Organization of Brain and Behavior*, MIT Press.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Kertesz, A., Polk, M., Black, S. E., & Howell, J., (1992), Anatomical asymmetries and functional laterality, *Brain*, *115 2*, 589-605, https://doi.org/10.1093/brain/115.2.589

Kibler, W. B., (1995), Biomechanical analysis of the shoulder during tennis activities, *Clinics in Sports Medicine*, *14 1*, 79-85.

Kibler, W. B., & Van der Meer, D., (2001), Mastering the Kinetic Chain, In P. Roetert & J. Groppel (Éd.), *World-Class Tennis Technique* (p. 99-113), Human Kinetics.

Kipp, K., & Kim, H., (2020), Relative Contributions and Capacities of Lower Extremity Muscles to Accelerate the Body's Center of Mass during Countermovement Jumps, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, *23 12*, 914-921, https://doi.org/10.1080/10255842.2020.1772764

Knudson, D., (2007), *Fundamentals of biomechanics* (2. ed), Springer.

Knudson, D., Luedtke, D., & Faribault, J., (1994), How to Analyze the Tennis Serve, *Strategies*, *7 8*, 19-22, https://doi.org/10.1080/08924562.1994.10592005

Komar, J., Seifert, L., & Thouvarecq, R., (2015), What variability tells us about motor expertise : measurements and perspectives from a complex system approach, *Movement & Sport Sciences*, *n° 89 3*, 65, https://doi.org/10.3917/sm.089.0065

Komitova, R., Raabe, D., Rein, R., & Memmert, D., (2022), Time Series Data Mining for Sport Data : a Review, *International Journal of Computer Science in Sport*, *21 2*, 17-31, https://doi.org/10.2478/ijcss-2022-0008

Kovacs, M., & Ellenbecker, T., (2011a), A Performance Evaluation of the Tennis Serve : Implications for Strength, Speed, Power, and Flexibility Training : *Strength and Conditioning Journal*, *33 4*, 22-30, https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e318225d59a

Kovacs, M., & Ellenbecker, T., (2011b), An 8-Stage Model for Evaluating the Tennis Serve, *Sports Health*, *3 6*, 504-513, https://doi.org/10.1177/1941738111414175

Kristiansen, M., Rasmussen, G. H., Sloth, M. E., & Voigt, M., (2019), Inter- and intra-individual variability in the kinematics of the back squat, *Human Movement Science*, *67*, 102510, https://doi.org/10.1016/j.humov.2019.102510

Laby, D. M., & Kirschen, D. G., (2011), Thoughts on Ocular Dominance—Is It Actually a Preference ?, *Eye & Contact Lens : Science & Clinical Practice*, *37 3*, 140-144, https://doi.org/10.1097/ICL.0b013e31820e0bdf

Lambrich, J., & Muehlbauer, T., (2023), Biomechanical analyses of different serve and groundstroke techniques in tennis : A systematic scoping review (L. Russo, Éd.), *PLOS ONE*, *18 8*, e0290320, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0290320

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Landlinger, J., Lindinger, S. J., Stöggl, T., Wagner, H., & Müller, E., (2010), Kinematic differences of elite and high-performance tennis players in the cross court and down the line forehand, *Sports Biomechanics*, *9 4*, 280-295, https://doi.org/10.1080/14763141.2010.535841

Langdown, B. L., Bridge, M., & Li, F.-X., (2012), Movement variability in the golf swing, *Sports Biomechanics*, *11 2*, 273-287, https://doi.org/10.1080/14763141.2011.650187

Latash, M. L., (2012), The bliss (not the problem) of motor abundance (not redundancy), *Experimental Brain Research*, *217 1*, 1-5, https://doi.org/10.1007/s00221-012-3000-4

Leardini, A., Cappozzo, A., Catani, F., Toksvig-Larsen, S., Petitto, A., Sforza, V., Cassanelli, G., & Giannini, S., (1999), Validation of a functional method for the estimation of hip joint centre location, *Journal of Biomechanics*, *32 1*, 99-103, https://doi.org/10.1016/S0021-9290(98)00148-1

Lee, M. C. Y., Chow, J. Y., Komar, J., Tan, C. W. K., & Button, C., (2014), Nonlinear Pedagogy : An Effective Approach to Cater for Individual Differences in Learning a Sports Skill (D. A. Robin, Éd.), *PLoS ONE*, *9 8*, e104744, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0104744

Lester, M., Peeling, P., Girard, O., Murphy, A., Armstrong, C., & Reid, M., (2023), From The Ground Up : Expert Perceptions of Lower Limb Activity Monitoring in Tennis, *Journal of Sports Science and Medicine*, 133-141, https://doi.org/10.52082/jssm.2023.133

Liang, Z., Wu, J., Yu, J., Ying, S., Liu, Z., Zhang, Y., Gu, Y., & Li, J., (2023), Comparison and analysis of the biomechanics of the lower limbs of female tennis players of different levels in foot-up serve, *Frontiers in Physiology*, *14*, 1125240, https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1125240

Lin, H.-T., Su, F.-C., Nakamura, M., & Chao, E. Y., (2003), Complex chain of momentum transfer of body segments in the baseball pitching motion, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, *26 6*, 861-868, https://doi.org/10.1080/02533839.2003.9670841

Loffing, F., Hagemann, N., & Strauss, B., (2009), The Serve in Professional Men's Tennis : Effects of Players' Handedness, *International Journal of Performance Analysis in Sport*, *9 2*, 255-274, https://doi.org/10.1080/24748668.2009.11868482

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Lopez-Diaz, C., Niño García, N., Sillero Quintana, M., & Lorenzo Calvo, A., (2015), May the multiple dominances principle improve the percentage average in the basketball shot ?, *Cuadernos de Psicología del Deporte*, *15 3*, 211-218, https://doi.org/10.4321/S1578-84232015000300024

Lussiana, T., & Gindre, C., (2016), Feel your stride and find your preferred running speed, *Biology Open*, *5 1*, 45-48, https://doi.org/10.1242/bio.014886

Lussiana, T., Gindre, C., Hébert-Losier, K., Sagawa, Y., Gimenez, P., & Mourot, L., (2017), Similar Running Economy With Different Running Patterns Along the Aerial-Terrestrial Continuum, *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *12 4*, 481-489, https://doi.org/10.1123/ijspp.2016-0107

Luyat, M., & Regia-Corte, T., (2009), Les Affordances : De James Jerome Gibson Aux Formalisations Récentes Du Concept : *L'Année psychologique*, *Vol. 109 2*, 297-332, https://doi.org/10.3917/anpsy.092.0297

Ma, S.-M., Liu, C.-C., Tan, Y., & 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, https://doi.org/10.1080/02640414.2013.775472

Mann, D. L., Runswick, O. R., & Allen, P. M., (2016), Hand and Eye Dominance in Sport : Are Cricket Batters Taught to Bat Back-to-Front ?, *Sports Medicine*, *46 9*, 1355-1363, https://doi.org/10.1007/s40279-016-0516-y

Mapp, A. P., Ono, H., & Barbeito, R., (2003), What does the dominant eye dominate ? A brief and somewhat contentious review, *Perception & Psychophysics*, *65 2*, 310-317, https://doi.org/10.3758/BF03194802

Marineau, E., Ducas, J., Mathieu, J., Rodriguez, A. D. P., Descarreaux, M., & Abboud, J., (2024), From Novice to Expert : How Expertise Shapes Motor Variability in Sports Biomechanics—a Scoping Review, *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *34 8*, e14706, https://doi.org/10.1111/sms.14706

Marshall, R., & Elliott, B., (2000), Long-axis rotation : The missing link in proximal-to-distal segmental sequencing, *Journal of Sports Sciences*, *18 4*, 247-254, https://doi.org/10.1080/026404100364983

Martens, J., Daly, D., Deschamps, K., Staes, F., & Fernandes, R. J., (2016), Inter-individual variability and pattern recognition of surface electromyography in front crawl swimming, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *31*, 14-21, https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2016.08.016

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Martin, C., Bideau, B., Ropars, M., Delamarche, P., & Kulpa, R., (2014), Upper limb joint kinetic analysis during tennis serve : Assessment of competitive level on efficiency and injury risks : Upper limb joint kinetics during tennis serve, *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *24 4*, 700-707, https://doi.org/10.1111/sms.12043

Martin, C., (2018), *Tennis : optimisation de la performance*, De Boeck supérieur.

Martin, C., Bideau, B., Bideau, N., Nicolas, G., Delamarche, P., & Kulpa, R., (2014), Energy Flow Analysis During the Tennis Serve : Comparison Between Injured and Noninjured Tennis Players, *The American Journal of Sports Medicine*, *42 11*, 2751-2760, https://doi.org/10.1177/0363546514547173

Martin, C., Bideau, B., Nicolas, G., Delamarche, P., & Kulpa, R., (2012), How does the tennis serve technique influence the serve-and-volley ?, *Journal of Sports Sciences*, *30 11*, 1149-1156, https://doi.org/10.1080/02640414.2012.695079

Martin, C., Kulpa, R., Delamarche, P., & Bideau, B., (2013), Professional tennis players' serve : correlation between segmental angular momentums and ball velocity, *Sports Biomechanics*, *12 1*, 2-14, https://doi.org/10.1080/14763141.2012.734321

Martin, C., Kulpa, R., Ropars, M., Delamarche, P., & Bideau, B., (2013), Identification of temporal pathomechanical factors during the tennis serve, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *45 11*, 2113-2119, https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318299ae3b

Martínez-Gallego, R., Jones, T., & Crespo, M., (2022), Impact of the ITF Tennis Play and Stay Campaign on 10-and-under Tennis : The Views of Top National Federation Experts, *ITF Coaching & Sport Science Review*, *30 86*, 37-41, https://doi.org/10.52383/itfcoaching.v30i86.321

Mavvidis, A., Ziagkas, E., & 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*, https://doi.org/10.20431/2454-6380.0402005

McGill, S. M., (1992), The Influence of Lordosis on Axial Trunk Torque and Trunk Muscle Myoelectric Activity : *Spine*, *17 10*, 1187-1193, https://doi.org/10.1097/00007632-199210000-00010

McNicholas, P. D., (2016), *Mixture Model-Based Classification* (1re éd.), Chapman and Hall/CRC, https://doi.org/10.1201/9781315373577

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Mecheri, S., Rioult, F., Mantel, B., Kauffmann, F., & Benguigui, N., (2016), The serve impact in tennis : First large-scale study of big Hawk-Eye data, *Statistical Analysis and Data Mining : The ASA Data Science Journal*, *9 5*, 310-325, https://doi.org/10.1002/sam.11316

Miles, W. R., (1930), Ocular Dominance in Human Adults, *The Journal of General Psychology*, *3 3*, 412-430, https://doi.org/10.1080/00221309.1930.9918218

Milligan, G. W., & Cooper, M. C., (1988), A study of standardization of variables in cluster analysis, *Journal of Classification*, *5 2*, 181-204, https://doi.org/10.1007/bf01897163

Montgomery, T., Boocock, M., & Hing, W., (2011), The effects of spinal posture and pelvic fixation on trunk rotation range of motion, *Clinical Biomechanics*, *26 7*, 707-712, https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2011.02.010

Morais, J. E., Barbosa, T. M., Neiva, H. P., Marques, M. C., & Marinho, D. A., (2022), Young Swimmers' Classification Based on Performance and Biomechanical Determinants : Determining Similarities Through Cluster Analysis, *Motor Control*, *26 3*, 396-411, https://doi.org/10.1123/mc.2021-0126

Moreno, M., Capdevila, L., & Losilla, J.-M., (2022), Could hand-eye laterality profiles affect sport performance ? A systematic review, *PeerJ*, *10*, e14385, https://doi.org/10.7717/peerj.14385

Moreno-Pérez, V., Elvira, J., Fernandez-Fernandez, J., & Vera-Garcia, F. J., (2018), A comparative study of passive shoulder rotation range of motion, isometric rotation strength and serve speed between elite tennis players with and without history of shoulder pain, *International Journal of Sports Physical Therapy*, *13 1*, 39-49.

Moreno-Pérez, V., López-Samanes, Á., Domínguez, R., Fernández-Elías, V. E., González-Frutos, P., Fernández-Ruiz, V., Pérez-López, A., & Fernández-Fernández, J., (2019), Acute effects of a single tennis match on passive shoulder rotation range of motion, isometric strength and serve speed in professional tennis players (S. J. Lindinger, Éd.), *PLOS ONE*, *14 4*, e0215015, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215015

Mourtzios, C., Athanailidis, I., Arvanitidou, V., & Kellis, E., (2022), Ankle and Knee Joint Kinematics Differ between Flat, Slice and Topspin Serves in Young Tennis Players, *European Journal of Sport Sciences*, *1 2*, 16-22, https://doi.org/10.24018/ejsport.2022.1.2.13

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Müller, H., & Loosch, E., (1999), Functional Variability and an Equifinal Path of Movement during Targeted Throwing, *Journal of Human Movement Studies*, *36*, 103-126.

Mullineaux, D. R., Bartlett, R. M., & Bennett, S., (2001), Research Design and Statistics in Biomechanics and Motor Control, *Journal of Sports Sciences*, *19 10*, 739-760, https://doi.org/10.1080/026404101317015410

Murata, M., & Fujii, N., (2022), Control of the Spin in a Tennis Serve Focusing on the Motion of the Upper Limb and Trunk, *International Journal of Sport and Health Science*, *20 0*, 152-169, https://doi.org/10.5432/ijshs.202144

Myers, J., Lephart, S., Tsai, Y.-S., Sell, T., Smoliga, J., & Jolly, J., (2008), The role of upper torso and pelvis rotation in driving performance during the golf swing, *Journal of Sports Sciences*, *26 2*, 181-188, https://doi.org/10.1080/02640410701373543

Myers, N. L., Kibler, W. B., Lamborn, L., Smith, B. J., English, T., Jacobs, C., & Uhl, T. L., (2017), Reliability and Validity of a Biomechanically Based Analysis Method for the Tennis Serve, *International Journal of Sports Physical Therapy*, *12 3*, 437-449, Récupérée mars 28, 2022, à partir de https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5455193/

Myers, N. L., Sciascia, A. D., Kibler, W. B., & Uhl, T. L., (2016), Volume-based Interval Training Program for Elite Tennis Players, *Sports Health : A Multidisciplinary Approach*, *8 6*, 536-540, https://doi.org/10.1177/1941738116657074

Newell, K. M., (1986), Constraints on the Development of Coordination, In M. G. Wade & H. T. A. Whiting (Éd.), *Motor Development in Children : Aspects of Coordination and Control* (p. 341-360), Springer Netherlands, https://doi.org/10.1007/978-94-009-4460-2_19

Newton, O., Girard, O., Chin, A., & Reid, M., (2025), The Hidden Link in the Kinematic Chain : The Influence of the Tossing arm on Head and Serve Kinematics in Tennis, *European Journal of Sport Science*, *25 8*, e70022, https://doi.org/10.1002/ejsc.70022

O'Donoghue, G. P., & Ballantyne, A., (2004), The impact of speed of service in Grand Slam singles tennis, In J.-F. Kahn, A. Lees & I. W. Maynard (Éd.), *Science and Racket Sports III : The Proceedings of the Eighth International Table Tennis Federation Sports Science Congress and the Third World Congress of Science and Racket Sports* (p. 179-184), Routledge.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

O'Donoghue, G. P., & Brown, E., (2008), The Importance of Service in Grand Slam Singles Tennis, *International Journal of Performance Analysis in Sport*, *8 3*, 70-78, https://doi.org/10.1080/24748668.2008.11868449

Okamura, S., & Iida, K., (2024), Relationship Between Lumbar Locked Rotation, Trunk Rotation During Pitching, and Pitch Velocity in High School Baseball Players, *International Journal of Sports Physical Therapy*, *19 11*, https://doi.org/10.26603/001c.123954

Otte, F. W., Davids, K., Millar, S. K., & Klatt, S., (2021), Understanding How Athletes Learn : Integrating Skill Training Concepts, Theory and Practice from an Ecological Perspective, *Applied Coaching Research Journal*, *7*, 22-33.

Palmer, K., Jones, D., Morgan, C., & Zeppieri, G., (2018), Relationship Between Range of Motion, Strength, Motor Control, Power, and the Tennis Serve in Competitive-Level Tennis Players : A Pilot Study, *Sports Health : A Multidisciplinary Approach*, *10*, 194173811878534, https://doi.org/10.1177/1941738118785348

Palmer, K., (2025, mars), *Novak Djokovic picks out his most underrated shot in a revealing interview*, Tennis365. https://www.tennis365.com/tennis-news/novak-djokovic-reveals-most-under-rated-shot-in-revealing-interview

Papadatou-Pastou, M., Ntolka, E., Schmitz, J., Martin, M., Munafò, M. R., Ocklenburg, S., & Paracchini, S., (2020), Human handedness : A meta-analysis., *Psychological Bulletin*, *146 6*, 481-524, https://doi.org/10.1037/bul0000229

Patoz, A., Lussiana, T., Thouvenot, A., Mourot, L., & Gindre, C., (2020), Duty Factor Reflects Lower Limb Kinematics of Running, *Applied Sciences*, *10 24*, 8818, https://doi.org/10.3390/app10248818

Phinyomark, A., Osis, S., Hettinga, B. A., & Ferber, R., (2015), Kinematic gait patterns in healthy runners : A hierarchical cluster analysis, *Journal of Biomechanics*, *48 14*, 3897-3904, https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2015.09.025

Piquer-Piquer, A., Crespo, M., Ramón-Llin, J., Guzmán, J. F., & Martínez-Gallego, R., (2025), Exploring the Impact of Equipment Modifications on Novice Tennis Players : A Scoping Review, *Frontiers in Psychology*, *16*, 1536427, https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1536427

Porac, C., & Coren, S., (1976), The dominant eye., *Psychological Bulletin*, *83 5*, 880-897, https://doi.org/10.1037/0033-2909.83.5.880

Portney, L. G., & Watkins, M. P., (2015), *Foundations of Clinical Research : Applications to Practice* (3rd edition, [revised]), Pearson/Prentice Hall.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Preatoni, E., Hamill, J., Harrison, A. J., Hayes, K., Van Emmerik, R. E., Wilson, C., & Rodano, R., (2013), Movement variability and skills monitoring in sports, *Sports Biomechanics*, *12 2*, 69-92, https://doi.org/10.1080/14763141.2012.738700

Pugh, S. F., Kovaleski, J. E., Heitman, R. J., & Gilley, W. F., (2003), Upper and Lower Body Strength in Relation to Ball Speed during a Serve by Male Collegiate Tennis Players, *Perceptual and Motor Skills*, *97 3*, 867-872, https://doi.org/10.2466/pms.2003.97.3.867

Ramsay, J. O., (2002), *Applied Functional Data Analysis : Methods and Case Studies*, Springer New York.

Ramsay, J. O., & Silverman, B. W., (2005), *Functional Data Analysis*, Springer New York, https://doi.org/10.1007/b98888

Ranganathan, R., & Newell, K. M., (2008), Motor synergies : feedback and error compensation within and between trials, *Experimental Brain Research*, *186 4*, 561-570, https://doi.org/10.1007/s00221-007-1259-7

Rauch, J., Leidersdorf, E., Reeves, T., Borkan, L., Elliott, M., & Ugrinowitsch, C., (2020), Different Movement Strategies in the Countermovement Jump Amongst a Large Cohort of NBA Players, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17 17*, 6394, https://doi.org/10.3390/ijerph17176394

Reed, M. P., Manary, M. A., & Schneider, L. W., (1999), Methods for Measuring and Representing Automobile Occupant Posture, 1999-01-0959, https://doi.org/10.4271/1999-01-0959

Regan, L., (2021), Comparing the Traditional and Constraints-Led Approaches to Skill Acquisition in Tennis, *ITF Coaching & Sport Science Review*, *29 84*, 28-30, https://doi.org/10.52383/itfcoaching.v29i84.205

Reid, M., Chow, J. W., & Crespo, M., (2003), Muscle Activity : An Indicator for Training, In B. Elliott, M. Reid & M. Crespo (Éd.), *Biomechanics of Advanced Tennis Coaching* (p. 109-137), International Tennis Federation.

Reid, M., Crespo, M., Lay, B., & Berry, J., (2007), Skill acquisition in tennis : Research and current practice, *Journal of Science and Medicine in Sport*, *10 1*, 1-10, https://doi.org/10.1016/j.jsams.2006.05.011

Reid, M., Elliott, B., & 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, https://doi.org/10.1249/mss.0b013e31815c6d61

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Reid, M., & Giblin, G., (2015), Another day, another tennis coaching intervention, but does this one do what coaches purport ?, *Sports Biomechanics*, *14 2*, 180-189, https://doi.org/10.1080/14763141.2015.1045549

Reid, M., Giblin, G., & 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, https://doi.org/10.1080/02640414.2014.962572

Reid, M., McMurtrie, D., & Crespo, M., (2010), The relationship between match statistics and top 100 ranking in professional men's tennis, *International Journal of Performance Analysis in Sport*, *10 2*, 131-138, https://doi.org/10.1080/24748668.2010.11868509

Reid, M., Whiteside, D., & Elliott, B., (2010), Effect of skill decomposition on racket and ball kinematics of the elite junior tennis serve, *Sports Biomechanics*, *9 4*, 296-303, https://doi.org/10.1080/14763141.2010.535843

Reid, M., Whiteside, D., & Elliott, B., (2011), Serving to different locations : set-up, toss, and racket kinematics of the professional tennis serve, *Sports Biomechanics*, *10 4*, 407-414, https://doi.org/10.1080/14763141.2011.629206

Rein, R., Button, C., Davids, K., & Summers, J., (2010), Cluster Analysis of Movement Patterns in Multiarticular Actions : A Tutorial, *Motor Control*, *14 2*, 211-239, https://doi.org/10.1123/mcj.14.2.211

Remedios, S. M., Armstrong, D. P., Graham, R. B., & Fischer, S. L., (2020), Exploring the Application of Pattern Recognition and Machine Learning for Identifying Movement Phenotypes During Deep Squat and Hurdle Step Movements, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *8*, https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00364

Renshaw, I., & Chow, J.-Y., (2019), A constraint-led approach to sport and physical education pedagogy, *Physical Education and Sport Pedagogy*, *24 2*, 103-116, https://doi.org/10.1080/17408989.2018.1552676

Rivadulla, A. R., Chen, X., Cazzola, D., Trewartha, G., & Preatoni, E., (2024), Clustering analysis across different speeds reveals two distinct running techniques with no differences in running economy, *Sports Biomechanics*, 1-24, https://doi.org/10.1080/14763141.2024.2372608

Robison, S. E., Block, S. S., Boudreaux, J. D., & Flora, R. J., (1999), Hand-eye dominance in a population with mental handicaps : prevalence and a comparison of methods, *Journal of the American Optometric Association*, *70 9*, 563-570.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Roetert, E. P., Brown, S. W., Piorkowskil, P. A., & Woods, R. B., (1996), Fitness Comparisons Among Three Different Levels of Elite Tennis Players, *The Journal of Strength and Conditioning Research*, *10 3*, 139, https://doi.org/10.1519/1533-4287(1996)010<0139:FCATDL>2.3.CO;2

Roetert, E. P., Ellenbecker, T. S., & Reid, M., (2009), Biomechanics of the Tennis Serve : Implications for Strength Training, *Strength & Conditioning Journal*, *31 4*, 35-40, https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e3181af65e1

Rogowski, I., Rouffet, D., Lambalot, F., Brosseau, O., & 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, https://doi.org/10.1123/jab.27.1.15

Rombouts, S. A., Barkhof, F., Sprenger, M., Jaap Valk & Scheltens, P., (1996), The functional basis of ocular dominance : functional MRI (fMRI) findings, *Neuroscience Letters*, *221 1*, 1-4, https://doi.org/10.1016/S0304-3940(96)13260-2

Ryan, W., Harrison, A., & Hayes, K., (2006), Functional data analysis of knee joint kinematics in the vertical jump, *Sports Biomechanics*, *5 1*, 121-138, https://doi.org/10.1080/14763141.2006.9628228

Sánchez-Pay, A., Ramón-Llin, J., Martínez-Gallego, R., Sanz-Rivas, D., Sánchez-Alcaraz, B. J., & Frutos, S., (2021), Fitness testing in tennis : Influence of anthropometric characteristics, physical performance, and functional test on serve velocity in professional players, *PloS One*, *16 11*, e0259497, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259497

Sánchez-Sixto, A., Harrison, A. J., & Floría, P., (2018), Larger Countermovement Increases the Jump Height of Countermovement Jump, *Sports (Basel, Switzerland)*, *6 4*, 131, https://doi.org/10.3390/sports6040131

Sazali, (2024), *The Dynamic Impact of Social Media on Sports Coaching Techniques*, Universiti Teknologi MARA, Negeri Sembilan, https://ir.uitm.edu.my/id/eprint/98378/

Scharoun, S. M., & Bryden, P. J., (2014), Hand Preference, Performance Abilities, and Hand Selection in Children, *Frontiers in Psychology*, *5*, https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00082

Schmidt, R. A., (1975), A schema theory of discrete motor skill learning., *Psychological Review*, *82 4*, 225-260, https://doi.org/10.1037/h0076770

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Schmidt, R. A., (1982), More on Motor Programs. In *Human Motor Behavior : An Introduction* (p. 189-217), Psychology Press.

Schmidt, R. A., & Lee, T. D., (2011), *Motor Control and Learning : A Behavioral Emphasis* (5^{e} éd.), Human Kinetics.

Schmutz, A., Jacques, J., Bouveyron, C., Chèze, L., & Martin, P., (2020), Clustering multivariate functional data in group-specific functional subspaces, *Computational Statistics*, *35 3*, 1101-1131, https://doi.org/10.1007/s00180-020-00958-4

Schöllhorn, W., Chow, J. Y., Glazier, P., & Button, C., (2013), Self-Organizing Maps and Cluster Analysis in Elite and Sub-Elite Athletic Performance, In K. Davids, R. Hristovski, D. Araújo, N. B. Serre, C. Button & P. Passos (Éd.), *Complex Systems in Sport* (p. 145-159), Routledge.

Schonborn, 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. K., Uhl, T. L., Mccrory, J., Mcginn, P., Ben Kibler, W., & Shapiro, R., (2008), A comparison of muscle activations during traditional and abbreviated tennis serves, *Sports Biomechanics*, *7 2*, 248-259, https://doi.org/10.1080/14763140701841746

Seifert, L., Chollet, D., & Allard, P., (2005), Arm coordination symmetry and breathing effect in front crawl, *Human Movement Science*, *24 2*, 234-256, https://doi.org/10.1016/j.humov.2005.05.003

Seifert, L., Leblanc, H., Herault, R., Komar, J., Button, C., & Chollet, D., (2011), Inter-individual variability in the upper–lower limb breaststroke coordination, *Human Movement Science*, *30 3*, 550-565, https://doi.org/10.1016/j.humov.2010.12.003

Seifert, L., Button, C., & Davids, K., (2013), Key Properties of Expert Movement Systems in Sport : An Ecological Dynamics Perspective, *Sports Medicine*, *43 3*, 167-178, https://doi.org/10.1007/s40279-012-0011-z

Seifert, L., Chehensse, A., Tourny-Chollet, C., Lemaitre, F., & Chollet, D., (2008), Effect of breathing pattern on arm coordination symmetry in front crawl, *Journal of Strength and Conditioning Research*, *22 5*, 1670-1676, https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318182029d

Seifert, L., & Davids, K., (2017), Ecological Dynamics : A Theoretical Framework for Understanding Sport Performance, Physical Education and Physical Activity, In P. Bourgine, P. Collet & P. Parrend (Éd.), *First Complex Systems Digital Campus World E-Conference 2015* (p. 29-40), Springer International Publishing, https://doi.org/10.1007/978-3-319-45901-1_3

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Seifert, L., Komar, J., Barbosa, T., Toussaint, H., Millet, G., & Davids, K., (2014), Coordination pattern variability provides functional adaptations to constraints in swimming performance, *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *44 10*, 1333-1345, https://doi.org/10.1007/s40279-014-0210-x

Senevirathna, A. M., Pohl, A. J., Jordan, M. J., Edwards, W. B., & Ferber, R., (2023), Differences in kinetic variables between injured and uninjured rearfoot runners : A hierarchical cluster analysis, *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *33 2*, 160-168, https://doi.org/10.1111/sms.14249

Served with Andy Roddick, (2025, mars), *The Rafa Nadal Interview | Served with Andy Roddick* [Interview publié le 11 mars 2025], https://www.youtube.com/watch?v=_SvPnVAJyVI

Shepherd, J., Henrikson, E., Lynn, S., & Wood, P., (2020), Clustering Golfers through Force Plate Analysis, *The 13th Conference of the International Sports Engineering Association*, 63, https://doi.org/10.3390/proceedings2020049063

Shiffrin, R. M., & Schneider, W., (1977), Controlled and automatic human information processing : II. Perceptual learning, automatic attending and a general theory., *Psychological Review*, *84 2*, 127-190, https://doi.org/10.1037/0033-295X.84.2.127

Smith, A., Roberts, J., Wallace, E., Kong, P. W., & Forrester, S., (2015), Golf Coaches' Perceptions of Key Technical Swing Parameters Compared to Biomechanical Literature, *International Journal of Sports Science & Coaching*, *10 4*, 739-755, https://doi.org/10.1260/1747-9541.10.4.739

Söğüt, M., (2017), A Comparison of Serve Speed and Motor Coordination between Elite and Club Level Tennis Players, *Journal of Human Kinetics*, *55 1*, 171-176, https://doi.org/10.1515/hukin-2017-0015

Speariett, S., & Armstrong, R., (2020), The Relationship Between the Golf-Specific Movement Screen and Golf Performance, *Journal of Sport Rehabilitation*, *29 4*, 425-435, https://doi.org/10.1123/jsr.2018-0441

Sprigings, E., Marshall, R., Elliott, B., & 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, https://doi.org/10.1016/0021-9290(94)90001-9

Stergiou, N., & Decker, L. M., (2011), Human movement variability, nonlinear dynamics, and pathology : Is there a connection ?, *Human Movement Science*, *30 5*, 869-888, https://doi.org/10.1016/j.humov.2011.06.002

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Stodden, D. F., Campbell, B. M., & Moyer, T. M., (2008), Comparison of trunk kinematics in trunk training exercises and throwing, *Journal of Strength and Conditioning Research*, *22 1*, 112-118, https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31815f2a1e

Stodden, D. F., Fleisig, G. S., McLean, S. P., Lyman, S. L., & Andrews, J. R., (2001), Relationship of Pelvis and Upper Torso Kinematics to Pitched Baseball Velocity, *Journal of Applied Biomechanics*, *17 2*, 164-172, https://doi.org/10.1123/jab.17.2.164

Stoszkowski, J., & Collins, D., (2016), Sources, topics and use of knowledge by coaches, *Journal of Sports Sciences*, *34 9*, 794-802, https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1072279

Sugiyama, Y., & Lee, M.-S., (2005), Relation of Eye Dominance with Performance and Subjective Ratings in Golf Putting, *Perceptual and Motor Skills*, *100 3*, 761-766, https://doi.org/10.2466/pms.100.3.761-766

Sweeney, M., Reid, M., & Elliott, B., (2012), Lower Limb and Trunk Function in the High Performance Tennis Serve, *JournalAsian Journal of Exercise and Sports Science*, *9 1*, 13-20.

Tanabe, S., & 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, https://doi.org/10.1080/14763140701491500

Taylor, M. J., McKay, M. J., Burns, J., Baldwin, J., & Birn-Jeffery, A. V., (2025), Age is just a number : Clustering gait and functional measures, *Gait & Posture*, *123*, 109962, https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2025.08.080

Thomas, N. G., Harden, L. M., & Rogers, G. G., (2005), Visual evoked potentials, reaction times and eye dominance in cricketers, *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, *45 3*, 428-433.

Tourny-Chollet, C., Seifert, L., & Chollet, D., (2009), Effect of Force Symmetry on Coordination in Crawl, *International Journal of Sports Medicine*, *30 03*, 182-187, https://doi.org/10.1055/s-0028-1104581

Touzard, P., (2021), *L'évolution Biomécanique Du Service Des Jeunes Joueurs de Tennis Élites : Identification Des Facteurs de Performance et de Risque de Blessures* [thèse de doct., Université Rennes 2].

Touzard, P., Kulpa, R., Bideau, B., Montalvan, B., & Martin, C., (2019), Biomechanical analysis of the "waiter's serve" on upper limb loads in young elite tennis players,

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

European Journal of Sport Science, *19 6*, 765-773, https : / / doi . org / 10 . 1080 / 17461391.2018.1539527

Touzard, P., Lecomte, C., Bideau, B., Kulpa, R., Fourel, L., Fadier, M., Cantin, N., & Martin, C., (2023), There is no rush to upgrade the tennis racket in young intermediate competitive players : The effects of scaling racket on serve biomechanics and performance, *Frontiers in Psychology*, *14*, 1104146, https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1104146

Trabelsi, I., Hérault, R., Baillet, H., Thouvarecq, R., Seifert, L., & Gasso, G., (2022), Identifying patterns in trunk/head/elbow changes of riders and non-riders : A cluster analysis approach, *Computers in Biology and Medicine*, *143*, 105193, https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.105193

Triolet, C., (2019), *Influence de la latéralité, de la position du regard et du type d'appuis sur la vitesse de balle, la précision et la biomécanique du coup droit en tennis*, Université Paris Descartes,
Presenters : _ :n333.

Tubez, F., Schwartz, C., Paulus, J., Croisier, J.-L., Brüls, O., Denoël, V., & Forthomme, B., (2017), Which tool for a tennis serve evaluation ? A review, *International Journal of Performance Analysis in Sport*, *17 6*, 1007-1033, https://doi.org/10.1080/24748668.2017.1419407

Tubez, F., Forthomme, B., Croisier, J.-L., Cordonnier, C., Brüls, O., Denoël, V., Berwart, G., Joris, M., Grosdent, S., & Schwartz, C., (2015), Biomechanical analysis of abdominal injury in tennis serves. A case report, *Journal of Sports Science & Medicine*, *14 2*, 402-412.

Tubez, F., Schwartz, C., Croisier, J.-L., Brüls, O., Denoël, V., Paulus, J., & Forthomme, B., (2021), Evolution of the trophy position along the tennis serve player's development, *Sports Biomechanics*, *20 4*, 431-443, https://doi.org/10.1080/14763141.2018.1560493

Vacek, J., Vagner, M., Cleather, D. J., & Stastny, P., (2023), A Systematic Review of Spatial Differences of the Ball Impact within the Serve Type at Professional and Junior Tennis Players, *Applied Sciences*, *13 6*, 3586, https : / / doi . org / 10 . 3390 / app13063586

Van der Meer, D., (2001), *Dennis Van der Meer's complete book of tennis*, Jameson Books ; Distributed by Kampmann,
OCLC : 13333678.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Van Trigt, B., Faneker, E., Leenen, A. J. R., Hoekstra, A. E., & Hoozemans, M. J. M., (2025), Uncovering the Hidden Mechanics of Upper Body Rotations in Tennis Serves Using Wearable Sensors on Dutch Professional Players, *Frontiers in Sports and Active Living*, *6*, 1463299, https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1463299

Vaverka, F., Cernosek, M., Tesarova, K., & Elfmark, M., (2005), The Influence of Body Height on the Serve in Tennis, *Proceedings of the 23rd International Symposium on Biomechanics in Sports*, 335-338, https://ojs.ub.uni-konstanz.de/cpa/article/view/769

Vaverka, F., & Cernosek, M., (2013), Association between Body Height and Serve Speed in Elite Tennis Players, *Sports Biomechanics*, *12 1*, 30-37, https://doi.org/10.1080/14763141.2012.670664

Vaverka, F., & Cernosek, M., (2016), Quantitative assessment of the serve speed in tennis, *Sports Biomechanics*, *15 1*, 48-60, https://doi.org/10.1080/14763141.2015.1123763

Vaverka, F., Nykodym, J., Hendl, J., Zhanel, J., & Zahradnik, D., (2018), Association between serve speed and court surface in tennis, *International Journal of Performance Analysis in Sport*, *18 2*, 262-272, https://doi.org/10.1080/24748668.2018.1467995

Vera-García, F., Ruiz-Pérez, I., Barbado, D., Juan-Recio, C., & McGill, S., (2014), Trunk and Shoulder EMG and Lumbar Kinematics of Medicine-Ball Side Throw and Side Catch and Throw, *European Journal of Human Movement*, *33*, 93-109.

Vereijken, B., Emmerik, R. E. A. V., Whiting, H. T. A., & Newell, K. M., (1992), Free(z)ing Degrees of Freedom in Skill Acquisition, *Journal of Motor Behavior*, *24 1*, 133-142, https://doi.org/10.1080/00222895.1992.9941608

Vergilino-Perez, D., Fayel, A., Lemoine, C., Senot, P., Vergne, J., & Doré-Mazars, K., (2012), Are There Any Left-Right Asymmetries in Saccade Parameters ? Examination of Latency, Gain, and Peak Velocity, *Investigative Opthalmology & Visual Science*, *53 7*, 3340, https://doi.org/10.1167/iovs.11-9273

Verlinden, M., Van Ruyskensvelde, J., Van Gorp, B., De Decker, S., Goossens, R., & Clarijs, J., (2004), Effect of Gender and Tennis Court Surface Properties upon Strategy in Elite Singles, In A. Lees, J. Kahn & I. Maynard (Éd.), *Science and Racket Sports III* (p. 163-168), Routledge.

Vicencio, E., (2014), Laterality in Tennis, *ITF Coaching and Sport Science Review*, *64*, 25-26.

Vorobiev, A., Ariel, G., & Dent, D., (1993), Biomechanical Similarities and Differences of A. Agassi's First and Second Serves, In J. Hamill, T. R. Derrick & E. H. Elliott

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

(Éd.), *Proceedings of the 11th Symposium of the International Society of Biomechanics in Sports* (p. 323-327), University of Massachusetts.

Wadman, W. J., Denier Van der Gon, J. J., Geuze, R. H., & Mol, C. R., (1979), Control of Fast Goal-Directed Arm Movements, *Journal of Human Movement Studies*, *5 1*, 3-17.

Wagner, H., Pfusterschmied, J., Tilp, M., Landlinger, J., von Duvillard, S. P., & Müller, E., (2014), Upper-body kinematics in team-handball throw, tennis serve, and volleyball spike : Kinematic differences in overarm movements, *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *24 2*, 345-354, https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2012.01503.x

Walls, G. L., (1951), A theory of ocular dominance, *Archives of Ophthalmology*, *45 4*, 387-412, https://doi.org/10.1001/archopht.1951.01700010395005

Wang, L.-H., Lo, K.-C., & Su, F.-C., (2021), Skill level and forearm muscle fatigue effects on ball speed in tennis serve, *Sports Biomechanics*, *20 4*, 419-430, https://doi.org/10.1080/14763141.2018.1560492

Warmenhoven, J., (2024), Over 30 years of using functional data analysis in human movement. What do we know, and is there more for sports biomechanics to learn ?, *Sports Biomechanics*, 1-32, https://doi.org/10.1080/14763141.2024.2398508

Warren Liao, T., (2005), Clustering of Time Series Data—a Survey, *Pattern Recognition*, *38 11*, 1857-1874, https://doi.org/10.1016/j.patcog.2005.01.025

Webb, A. R., (2003), *Statistical Pattern Recognition*, John Wiley & Sons.

Whiteside, D., Elliott, B., Lay, B., & Reid, M., (2013a), A kinematic comparison of successful and unsuccessful tennis serves across the elite development pathway, *Human Movement Science*, *32 4*, 822-835, https://doi.org/10.1016/j.humov.2013.06.003

Whiteside, D., Elliott, B., Lay, B., & Reid, M., (2013b), The Effect of Age on Discrete Kinematics of the Elite Female Tennis Serve, *Journal of Applied Biomechanics*, *29 5*, 573-582, https://doi.org/10.1123/jab.29.5.573

Whiteside, D., Elliott, B., Lay, B., & Reid, M., (2015), Coordination and variability in the elite female tennis serve, *Journal of Sports Sciences*, *33 7*, 675-686, https://doi.org/10.1080/02640414.2014.962569

Whiteside, D., & 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, https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1183805

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Whiting, H., Vogt, S., & Vereyken, B., (1992), Human Skill and Motor Control : Some Aspects of the Motor Control - Motor Learning Relation, In J. J. Summers (Éd.), *Approaches to the Study of Motor Control and Learning* (p. 81-111, T. 84), Elsevier, https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)61683-0

Wilke, J. T., (1977), Ultradian Biological Periodicities in the Integration of Behavior, *International Journal of Neuroscience*, *73*, 125-143, https://doi.org/10.3109/00207457709147661

Winter, D. A., (1995), Human Balance and Posture Control during Standing and Walking, *Gait & Posture*, *34*, 193-214.

Wong, F. K., Keung, J. H., Lau, N. M., Ng, D. K., Chung, J. W., & Chow, D. H., (2014), Effects of Body Mass Index and Full Body Kinematics on Tennis Serve Speed, *Journal of Human Kinetics*, *401*, 21-28, https://doi.org/10.2478/hukin-2014-0003

Ws, E., (2018), Center of Mass of the Human Body Helps in Analysis of Balance and Movement, *MOJ Applied Bionics and Biomechanics*, *22*, https://doi.org/10.15406/mojabb.2018.02.00057

Young, J., Casazza, B., Press, J., & Herring, S., (1998), Biomechanical Aspects of the Spine in Pitching, In J. Andrews, B. Zarins & K. Wilk (Éd.), *Injuries in Baseball* (p. 23-35), Lippincott-Raven.

Zahálka, F., Malý, T., Malá, L., Ejem, M., & Zawartka, M., (2017), Kinematic Analysis of Volleyball Attack in the Net Center with Various Types of Take-Off, *Journal of Human Kinetics*, *58*, 261-271, https://doi.org/10.1515/hukin-2017-0115

Zatsiorsky, V., Seluyanov, V., & Chugunova, L., (1990), Methods of Determining Mass-Inertial Characteristics of Human Body Segments, In G. Chernyi & S. Regirer (Éd.), *Contemporary Problems of Biomechanics* (p. 272-291), CRC Press.

Zhang, Z., Li, S., Wan, B., Visentin, P., Jiang, Q., Dyck, M., Li, H., & Shan, G., (2016), The Influence of X-Factor (Trunk Rotation) and Experience on the Quality of the Badminton Forehand Smash, *Journal of Human Kinetics*, *531*, 9-22, https://doi.org/10.1515/hukin-2016-0006

Zheng, N., Barrentine, S., Fleisig, G., & Andrews, J., (2008), Kinematic Analysis of Swing in Pro and Amateur Golfers, *International Journal of Sports Medicine*, *296*, 487-493, https://doi.org/10.1055/s-2007-989229

Ziagkas, E., Mavvidis, A., & Laios, A., (2017), Investigating the Role of Ipsilateral and Contralateral Eye-Hand Dominance in Tennis Serve Accuracy of Amateur Tennis Players, *Journal of Physical Education and Sport*, *1702*.

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

Zin, M. A. M., Rambely, A. S., Ariff, N. M., & Ariffin, M. S., (2020), Smoothing and Differentiation of Kinematic Data Using Functional Data Analysis Approach : An Application of Automatic and Subjective Methods, *Applied Sciences*, *10 7*, 2493, https://doi.org/10.3390/app10072493

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

TABLE DES FIGURES

2.1 Facteurs influençant la hauteur d'impact au service 7
2.2 Représentation de l'angle de projection défini entre la trajectoire de la balle au moment de l'impact et l'horizontale 8
2.3 Représentation schématique des zones d'atterrissage de la balle pour les aces et les services retournés 9
2.4 Décomposition du service en trois phases : la préparation, la propulsion et le mouvement de la raquette vers l'avant 12
2.5 Exemples de services avec différentes techniques d'appuis 17
2.6 Rotations du tronc autour des axes transverse, antéro-postérieur et longitudinal 20
2.7 Inclinaison latérale du tronc vers l'arrière au moment de l'armée 21
2.8 Trajectoire verticale du CoM 27
2.9 Angle de séparation entre la ligne des épaules et celle des hanches dans le plan transverse au moment de l'armée 29
2.10 Modèle simplifié du traitement de l'information 41
2.11 Activités EMG du triceps (agoniste) et du biceps (antagoniste) lors d'un mouvement rapide d'extension du coude 42
2.12 Schéma simplifié de la théorie de Schmidt 43
2.13 Schéma récapitulatif de la théorie de « la boucle fermée » 44
2.14 Modèle simplifié de la théorie dynamique 45
2.15 Typologie de la variabilité du mouvement lors d'un tir au panier 49
2.16 Illustration de la variabilité de deux mouvements de marteau réalisés par un forgeron expert 53
2.17 Représentation schématique de la variabilité inter-individuelle en fonction du niveau d'expertise 54
2.18 Relation théorique entre les contraintes liées à la tâche et le nombre de stratégies de mouvement possibles avec l'augmentation des capacités motrices 55
2.19 Modèle du service intégrant des éléments techniques structurés et interconnectés 62

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

2.20 Exemples de vidéos de réseaux sociaux présentant un service « parfait » à imiter 67

4.1 Modèle de placement des marqueurs sur le joueur 74
4.2 Modèle de placement des marqueurs sur la raquette 76
4.3 Représentation schématique du protocole expérimental pour un joueur droitier 77
4.4 Reconstruction de la position 3D des marqueurs à l'aide du logiciel Qualisys Track Manager 77

5.1 Illustrations des instants clés, des phases du service et de certaines variables cinématiques étudiées pour le CoM 83
5.2 Positions et vitesses verticales du CoM 86
5.3 Évolution des angles des genoux avant et arrière au cours du service 88
5.4 Évolution de la position et de la vitesse verticale du CoM au cours des services des joueurs A et B 96
5.5 Méthode de calcul de la position antéro-postérieure de l'impact et du CoM 102
5.6 Trajectoires et vitesses verticales et antéro-postérieures du CoM au cours du service pour les joueurs du cluster 1 et du cluster 2 104
5.7 Trajectoire verticale du CoM en fonction de la trajectoire horizontale pour le cluster 1 et le cluster 2 112
5.8 Illustration comparative des stratégies motrices à différents instants clés du service entre deux joueurs représentatifs de chaque cluster 113

6.1 Exemple de 2 joueurs présentant des organisations du tronc différentes : une dissociation très marquée entre les lignes des hanches et des épaules dans le plan transverse et une dissociation plus limitée 120
6.2 Phases et moments-clés du service (vue de dessus) 122
6.3 Représentation de l'angle des épaules, de l'angle des hanches et de l'angle de séparation dans le plan transverse pour un joueur droitier 123
6.4 Évolution des angles des épaules, des hanches et des angles de séparation au cours du service 125
6.5 Évolution des vitesses de rotation longitudinale du pelvis et du thorax au cours du service 126

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

6.6 Dispersion des timings d'apparition des angles maximaux et des vitesses maximales au cours du service 128
6.7 Dispersion des timings d'apparition des angles maximaux et des vitesses maximales au cours du service 129
6.8 Évolution de l'angle des épaules, des hanches et de l'angle de séparation au cours du service chez 4 joueurs de notre population (A, B, C et D) 133
6.9 Méthode de calcul des positions d'impact antéro-postérieure et latérale . . 138
6.10 Représentation du degré d'incertitude d'appartenance à un des clusters par joueur selon les différents paramètres cinématiques du service 142
6.11 Évolution des angles des épaules, des hanches et de séparation et des vitesses de rotation longitudinale du pelvis et du thorax au cours du service pour les 3 clusters. 146
6.12 Seated Trunk Rotation Test (STRT) 158
6.13 Side Medicine Ball Throw (SMBT) 159

7.1 Mise en place du test « hole-in-card » 171
7.2 Paramètres angulaires et position latérale d'impact calculés au moment de l'impact balle–raquette 173

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

LISTE DES TABLEAUX

2.1 Évolution de la vitesse linéaire maximale par articulation 13
2.2 Vitesses angulaires maximales et timing d'apprition au cours du service chez des joueurs et joueuses de tennis professionnels 13
2.3 Vitesses verticales maximales des hanches avant et arrière obtenues dans la littérature 16
2.4 Comparaison des paramètres cinématiques et dynamiques entre la technique du relais d'appuis et la technique des appuis écarts 18
2.5 Angles internes de flexion maximale des genoux mesurés dans différentes études 23
2.6 Corrélations significatives entre les paramètres anthropométriques et la vitesse de la balle au service 31
2.7 Corrélations significatives obtenues entre les tests ou les qualités physiques et la vitesse de balle au service 33
2.8 Exemples de contraintes s'exerçant sur un joueur de tennis en situation de service 47
2.9 Grille d'évaluation visuelle du service OTSA 63

4.1 Repères anatomiques pour le placement des marqueurs sur le corps du joueur 75

5.1 Données descriptives et coefficients de variation de la vitesse maximale de la tête de raquette et de la hauteur d'impact 86
5.2 Données descriptives des paramètres cinématiques du CoM, de la durée des phases et coefficients de variation inter et intra-individuelle 87
5.3 Données descriptives des angles des genoux avant et arrière 89
5.4 Données descriptives des paramètres cinématiques des genoux avant et arrière et leurs coefficients de variation 89
5.5 Coefficients de corrélation de Pearson et de Spearman entre les paramètres cinématiques du CoM et les indicateurs de performance 90

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

5.6 Coefficients de corrélation de Pearson et de Spearman entre les paramètres cinématiques des genoux et les indicateurs de performance 91
5.7 Comparaison des paramètres anthropométriques et des indicateurs de performance entre les clusters 1 et 2 105
5.8 Comparaison des paramètres cinématiques discrètes du CoM entre Cluster 1 et Cluster 2 107
5.9 Comparaison des paramètres cinématiques discrètes des genoux avant et arrière entre Cluster 1 et Cluster 2 108
5.10 Comparaison des paramètres temporels entre les clusters 1 et 2 109

6.1 Moyennes, écarts-types et valeurs maximales et minimales des angles des épaules, des hanches et des angles de séparation à différents moments-clés du service 124
6.2 Moyennes, écarts-types et coefficients de variation des vitesses maximales de rotation longitudinales du pelvis et du thorax 125
6.3 Moyennes, écarts-types et coefficients de variation des paramètres temporels 126
6.4 Coefficients de corrélation de Pearson et de Spearman entre les paramètres cinématiques du tronc et la vitesse de balle 127
6.5 Variables discrètes utilisées comme données d'entrée pour l'algorithme de clustering 140
6.6 Probabilités d'appartenance aux clusters pour les 6 joueurs présentant les plus grandes incertitudes 143
6.7 Comparaison des paramètres anthropométriques, de la vitesse de balle, des positions d'impact et de la répartition selon la technique d'appuis utilisée entre les 3 clusters 143
6.8 Comparaison des paramètres angulaires de rotation longitudinale du tronc entre les clusters 1, 2 et 3 145
6.9 Comparaison des paramètres temporels de rotation longitudinale du tronc entre les clusters 1, 2 et 3 147
6.10 Variables mesurées lors du service et lors des tests STRT et SMBT 160
6.11 Moyennes et écarts-types de la vitesse de balle et des paramètres cinématiques mesurés lors du service, du SMBT et du STRT 161
6.12 Corrélations de Pearson et de Spearman entre les paramètres cinématiques du service et ceux du SMBT, ainsi que entre les paramètres cinématiques du SMBT et la vitesse de balle 162

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

7.1 Comparaison des paramètres anthropométriques, de la vitesse de balle et des positions d'impact 174
7.2 Comparaison des paramètres cinématiques du tronc et du membre supérieur dominant 175

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

LISTE DES CONTRIBUTIONS

Articles scientifiques

— **Deghaies, K.**, Lussiana, T., Touzard, P., Fourel, L., Ozan, S., Brechbuhl, C., Gindre, C., Bideau, B., & Martin, C. (2025), Tennis serve constraints delimit but do not prohibit individual movement strategies among professional players. *Journal of Human Kinetics*. https://doi.org/10.5114/jhk/203795 /

— **Deghaies, K.**, Martin, C., Touzard, P., Brechbuhl, C., Duboscq, J. M., Lussiana, T., Gindre, C. (2021), The effect of natural preferences on serving biomechanics : a new approach to the motor skills of tennis players. *ITF Coaching & Sport Science Review, 29(84)*, 15-17. https://doi.org/10.52383/itfcoaching.v29i84.201

— Fourel, L., Touzard, P., Fadier, M., Arles, L., **Deghaies, K**., Ozan, S., Martin, C. (2024), Relationships Between Force-Time Curve Variables and Tennis Serve Performance in Competitive Tennis Players. *Journal of Strength and Conditioning Research, 38 (9)*, pp.1667- 1674. https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004848

Résumés publiés

— **Deghaies, K.**, Lussiana, T., Touzard, P., Fourel, L., Ozan, S., Gindre, C., Benoit, B., Martin, C. (2024), Inter-Individual Variability in Knee Kinematics During the Tennis Serve. *ISBS Proceedings Archive, 42(1)*. https://commons.nmu.edu/isbs/vol42/iss1/211

Participation à des congrès internationaux

— **Deghaies, K.**, Lussiana, T., Touzard, P., Fourel, L., Ozan, S., Gindre, C., Benoit, B., Martin, C. Inter-individual variability in knee kinematics during the tennis serve. *42nd Annual Congress of the International Society of Biomechanics in Sports*, Juillet 2024, Salzbourg, Autriche. (Présentation orale)

DEGHAIES, Kaies. Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique - 2026

— **Deghaies, K.**, Lussiana, T., Touzard, P., Fourel, L., Ozan, S., Gindre, C., Benoit, B., Martin, C. Uncovering two effective serve strategies through clustering in professional tennis players. *29th Annual Congress of the European College of Sport Science*, European College of Sport Science, Juillet 2024, Glasgow, Ecosse. (Poster)

Formations d'entraîneurs

— Animation d'une journée de formation sur les principes biomécaniques du service au tennis et leur application sur le terrain, à destination des stagiaires DEJEPS de la Ligue de tennis de Nouvelle-Aquitaine, Talence, Septembre 2023.

Vulgarisation scientifique

— Présentation des travaux de recherche du laboratoire M2S à l'issue de la projection du film L'Empire de la perfection, Rennes, Octobre 2024

COLLEGE DOCTORAL BRETAGNE
EDUCATION, LANGAGES INTERACTIONS, COGNITION CLINIQUE, EXPERTISE

UNIVERSITÉ RENNES 2

Titre : Stratégies motrices et variabilité inter-individuelle du service au tennis chez les joueurs experts : vers la démystification d'un modèle technique unique

Mots clés : Cinématique, Contrôle Moteur, Analyse de Clusters, Individualisation, Rotation du Tronc, Latéralité

Résumé : Dans le tennis de haut niveau, la quête d'une technique de service « idéale » a longtemps orienté les recherches en biomécanique et les pratiques d'entraînement. Les études se sont principalement concentrées sur la comparaison des données cinématiques moyennes entre joueurs de niveaux différents, considérant souvent la variabilité comme une source d'erreur. La théorie dynamique du contrôle moteur propose un changement de paradigme : cette variabilité traduit l'existence de multiples solutions motrices permettant d'atteindre un même objectif. La théorie des systèmes dynamiques offre un cadre pour expliquer cette diversité, en soulignant l'influence des contraintes liées à l'organisme, à la tâche et à l'environnement, qui façonnent un style moteur propre à chaque joueur. La présente thèse s'inscrit dans cette perspective et a analysé la variabilité inter-individuelle des paramètres cinématiques, en étudiant les trajectoires du centre de masse, les mouvements des genoux dans le plan sagittal et les rotations du tronc dans le plan transverse. Une attention particulière a été accordée à des aspects qui suscitent depuis longtemps l'intérêt des entraîneurs, tels que la dissociation hanches-épaules et la latéralité oculo-manuelle. L'utilisation de méthodes de clustering adaptées aux données discrètes/fonctionnelles a permis d'identifier des stratégies motrices distinctes employées au service, ouvrant la voie à un entraînement individualisé, respectueux des spécificités motrices de chaque joueur et orienté vers la performance.

Title: Motor strategies and inter-individual variability in the tennis serve among expert players: towards demystifying a single technical model

Keywords: Kinematics, Motor Control, Cluster Analysis, Individualization, Trunk Rotation, Laterality

Abstract: In high-level tennis, the pursuit of an "ideal" serve has long guided biomechanics research and training practices. Studies have primarily focused on comparing average kinematic data across players of different skill levels, often considering inter-individual variability as a source of error. The dynamic motor control theory offers a different perspective: such variability reflects the existence of multiple motor solutions to achieve the same goal. Dynamical systems theory provides a framework for explaining this diversity by highlighting the influence of constraints related to the organism, the task, and the environment, which shape a motor style specific to each player. Within this theoretical framework, the present thesis explored inter-individual variability in kinematic parameters by analyzing center of mass displacement, sagittal-plane knee movements, and transverse-plane trunk rotations. Special attention was given to key aspects of coaching interest, such as hip-shoulder separation and ocular-manual laterality. The use of clustering methods adapted to discrete/functional data made it possible to identify the different motor strategies employed during the tennis serve, paving the way for individualized training approaches that respect each player's motor specificities and are oriented toward performance optimization.