



**UNIL** | Université de Lausanne

Unicentre

CH-1015 Lausanne

<http://serval.unil.ch>

---

*Year : 2018*

## Suivi physiologique et entraînement en hypoxie chez des joueurs de tennis élite.

Brechbuhl Cyril

Brechbuhl Cyril, 2018, Suivi physiologique et entraînement en hypoxie chez des joueurs de tennis élite.

Originally published at : Thesis, University of Lausanne

Posted at the University of Lausanne Open Archive <http://serval.unil.ch>

Document URN : urn:nbn:ch:serval-BIB\_D6A4744C2A4A6

### **Droits d'auteur**

L'Université de Lausanne attire expressément l'attention des utilisateurs sur le fait que tous les documents publiés dans l'Archive SERVAL sont protégés par le droit d'auteur, conformément à la loi fédérale sur le droit d'auteur et les droits voisins (LDA). A ce titre, il est indispensable d'obtenir le consentement préalable de l'auteur et/ou de l'éditeur avant toute utilisation d'une oeuvre ou d'une partie d'une oeuvre ne relevant pas d'une utilisation à des fins personnelles au sens de la LDA (art. 19, al. 1 lettre a). A défaut, tout contrevenant s'expose aux sanctions prévues par cette loi. Nous déclinons toute responsabilité en la matière.

### **Copyright**

The University of Lausanne expressly draws the attention of users to the fact that all documents published in the SERVAL Archive are protected by copyright in accordance with federal law on copyright and similar rights (LDA). Accordingly it is indispensable to obtain prior consent from the author and/or publisher before any use of a work or part of a work for purposes other than personal use within the meaning of LDA (art. 19, para. 1 letter a). Failure to do so will expose offenders to the sanctions laid down by this law. We accept no liability in this respect.



**UNIL** | Université de Lausanne

Faculté de biologie  
et de médecine

**Institut des Sciences du Sport**

# **Suivi physiologique et entraînement en hypoxie chez des joueurs de tennis élite.**

**Thèse de doctorat ès sciences de la vie (PhD)**

présentée à la

Faculté de biologie et de médecine  
de l'Université de Lausanne

par

**Cyril BRECHBUHL**

Master en sciences du sport de l'Université Paris V

**Jury**

Prof. Charles Benaim (Département de l'appareil locomoteur, CHUV), Président  
Prof. Grégoire Millet (ISSUL, FBM), Directeur de thèse  
Dr. Laurent Schmitt (ENSM / ISSUL), Co-directeur  
Dr. Gérald Grémion (Département de l'appareil locomoteur, CHUV / SOMC), expert  
Dr. Davide Malatesta (ISSUL, FBM), expert

Lausanne, Juin 2018



UNIL | Université de Lausanne

Faculté de biologie  
et de médecine

**Ecole Doctorale**

**Doctorat ès sciences de la vie**

# Imprimatur

Vu le rapport présenté par le jury d'examen, composé de

<b>Président·e</b>	Monsieur Prof. Charles <b>Benaim</b>
<b>Directeur·trice de thèse</b>	Monsieur Prof. Grégoire <b>Millet</b>
<b>Co-directeur·trice</b>	Monsieur Dr Laurent <b>Schmitt</b>
<b>Expert·e·s</b>	Monsieur Dr Davide <b>Malatesta</b> Monsieur Dr Gérald <b>Gremion</b>

le Conseil de Faculté autorise l'impression de la thèse de

**Monsieur Cyril Brechbuhl**

Master 2 Sport, Expertise et Performance de Haut Niveau Université Paris 5, France

intitulée

**Suivi physiologique et entraînement en hypoxie  
chez des joueurs de tennis élite**

Lausanne, le 26 juin 2018

pour le Doyen  
de la Faculté de biologie et de médecine

CHUV  
Professeur Charles **BENAIM**  
Div. de Médecine physique et Réhabilitation  
DAL - Hôpital orthopédique  
1011 - Lausanne

Prof. Charles Benaim



**UNIL** | Université de Lausanne

Faculté de biologie  
et de médecine

**Institut des Sciences du Sport**

# **Suivi physiologique et entraînement en hypoxie chez des joueurs de tennis élite.**

**Thèse de doctorat ès sciences de la vie (PhD)**

présentée à la

Faculté de biologie et de médecine  
de l'Université de Lausanne

par

**Cyril BRECHBUHL**

Master en sciences du sport de l'Université Paris V

**Jury**

Prof. Charles Benaim (Département de l'appareil locomoteur, CHUV), Président  
Prof. Grégoire Millet (ISSUL, FBM), Directeur de thèse  
Dr. Laurent Schmitt (ENSM / ISSUL), Co-directeur  
Dr. Gérald Grémion (Département de l'appareil locomoteur, CHUV / SOMC), Expert  
Dr. Davide Malatesta (ISSUL, FBM), Expert

Lausanne, Juin 2018



*« Détourne –toi de ceux qui te découragent de tes ambitions. C'est l'habitude des mesquins. Ceux qui sont vraiment grands te font comprendre que toi aussi tu peux le devenir. »* **Mark Twain**

*« Choisis toujours le chemin qui semble le meilleur même s'il paraît plus difficile : l'habitude le rendra bientôt agréable. »*  
**Pythagore**

*« L'innovation, c'est une situation qu'on choisit parce qu'on a une passion brûlante pour quelque chose. »* **Steve Jobs**

## Remerciements

*« Tout travail scientifique est une réalisation communautaire et non pas l'œuvre d'un cavalier seul. Qui sait où Darwin se serait égaré en 1837 sans Gould, sans Owen, et sans la vie scientifique très active de Londres et de Cambridge ? » **Stephen Jay Gould***

Alimenté régulièrement par les vibrations de la performance ces vingt dernières années, avec quelques points culminants, j'ai toujours été intéressé par l'innovation et les perspectives ouvertes par les sciences du sport.

La complexité de la performance de haut niveau et son monde hautement concurrentiel m'ont naturellement orienté vers des collaborations qui m'ont permis d'accéder aux contenus les plus élaborés.

Mon parcours est caractérisé par une alternance entre une activité « de terrain » et une activité de formation continue théorique. Il y a dix ans, après une folle saison sportive 2008, j'ai provoqué la rencontre avec L. Schmitt. Assez rapidement, s'est imposée l'opportunité du stress hypoxique comme levier de préparation physique, et notre collaboration a progressivement pris de l'ampleur. De nos échanges multiples et de nos intérêts communs est d'abord né ce projet de test d'effort spécifique au tennis. Puis l'opportunité de greffer une nouvelle technique d'entraînement en hypoxie (Répétition de Sprints en Hypoxie) s'est présentée avec G. Millet et son équipe de l'UNIL.

Il a fallu compter sur la patience, la bienveillance, et les encouragements de Laurent et Grégoire pour tenir ce projet et le finaliser, voire de le faire évoluer au gré de nos observations et de nos adaptations.

A travers cette démarche, j'ai eu l'opportunité et la nécessité de développer de nouvelles compétences ainsi que de nouvelles collaborations avec O. Girard et F. Brocherie notamment. Au-delà de nouveaux outils et de nouvelles techniques de travail, j'ai appris à décoder un nouvel environnement, et à me l'approprier afin de mieux servir l'activité qui m'est chère : favoriser et accompagner la performance et les aventures humaines qui y sont liées.

Sans l'accord initial de la Fédération Française de Tennis, le soutien inconditionnel de Bernard (appelé « Doc' ») et mon compagnon de cordée Eric Wino', ce projet n'aurait jamais abouti.

Je salue l'abnégation de ma famille (Ophélie, mes parents, Mathis, Gabin) dans la gestion de ce projet, de m'avoir supporté même lorsque je n'étais qu'accaparé par les enjeux d'une publication en cours ou par l'organisation de la prochaine manip'. Ils semblaient les plus certains que tout se déroulerait positivement malgré les difficultés.

Je souhaite vivement remercier l'UNIL et ses membres qui ont apprécié, suivi et valorisé mes expérimentations. Sans vos feedbacks, mon travail n'aurait pas la même substance, pas la même consistance, pas la même saveur, et je n'aurais pas eu le même plaisir, la même fierté de le formaliser.

## Liste des publications

### Articles « peer-reviewed »

1. Brechbuhl C., Millet G., Schmitt L. (2016). Accuracy and Reliability of a New Tennis Ball Machine. *Journal of Sports Science and Medicine* 15(2) pp. 263-267.
2. Brechbuhl C., Girard O., Millet G.P., Schmitt L. (2016). On the Use of a Test to Exhaustion Specific to Tennis (TEST) with Ball Hitting by Elite Players. *PLoS One* 11(4) pp. e0152389.
3. Brechbuhl C., Girard O, Millet GP, Schmitt L. (2016). Stress test specific to tennis (Test): Case study of an elite player. *ITF Coaching & Sport Science Review* (70):26-9.
4. Brechbuhl C., Girard O., Millet G. P., Schmitt L. (2017). Technical alterations during an incremental field test in elite male tennis players. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 49(9), 1917-1926.
5. Brechbuhl C., Girard O., Millet G. P., Schmitt L. (2017). Towards polarized training in tennis? Usefulness of combining technical and physiological assessments during a new incremental field test. *ITF Coaching & Sport Science Review* (73):18-21.
6. Brechbuhl C., Schmitt L., Millet G. P., Brocherie F. (2018). Shock microcycle of repeated-sprint training in hypoxia and tennis performance: case study in a rookie professional player. *International Journal of Sports Science and Coaching*.
7. Brechbuhl C., Brocherie F., Millet G. P., Schmitt L (2018). Effects of repeated-sprint training in hypoxia on tennis-specific performance in well-trained players. *Sports Medicine International Open*. En révision.
8. Brechbuhl C., Girard O., Millet G. P., Schmitt L. (2018). Physiological and technical differences between junior and professional female tennis players during an incremental field test. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. En révision.

Chapitre de Livre :

Evaluation et développement des ressources physiologiques du joueur de tennis  
(Chapitre 2, in Tennis, Ed. DeBoeck Université). Girard O., Brechbuhl C., Schmitt L.,  
Millet G.P. En cours d'édition



# Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	<b>5</b>
<b>Liste des publications</b> .....	<b>6</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>8</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>11</b>
<b>Index des abréviations</b> .....	<b>13</b>
<b>Liste des figures et tableaux</b> .....	<b>15</b>
<b>1. Introduction</b> .....	<b>17</b>
1.1. Introduction générale : la performance de haut niveau au tennis et ses problématiques.....	18
1.2 Caractéristiques du tennis : une activité intermittente.....	19
1.2.1 Structure temporelle des matchs de tennis.....	20
1.2.2 Temps réel de jeu et durée des points.....	20
1.2.3 La répartition du nombre des points en fonction de leur durée et du nombre de frappes.....	22
1.2.4 Tennis et jeu de jambes.....	23
1.2.5 Nature de l'effort spécifique au tennis : réponses physiologiques et métaboliques pendant le jeu.....	24
1.2.5.1 Fréquence cardiaque.....	25
1.2.5.2 Consommation d'oxygène ( $\dot{V}O_2$ ).....	26
1.2.5.3 Lactatémie.....	28
1.2.5.4 Difficulté de l'effort perçu (RPE).....	28
1.2.6 Vitesse de balle.....	29
1.1.7 Surface et influence sur le jeu.....	29
1.3 Tests d'effort.....	31
1.3.1 Les recommandations scientifiques et médicales pour la définition d'un test d'effort avec incrémentation.....	31
1.3.2 Détermination de l'atteinte d'une Puissance Maximale Aérobie.....	32
1.3.3 La phase de vérification pour confirmer la $\dot{V}O_{2max}$ .....	33
1.3.4 Les tests de terrain.....	33
1.3.4.1 Tests généraux (non spécifiques).....	33
1.3.4.2 Tests semi-spécifiques.....	34
1.3.4.3 Tests spécifiques (physiques et/ou techniques).....	35
1.4 Répétition de Sprints en Hypoxie (RSH).....	45
1.4.1 RSH et amélioration des qualités physiques.....	48
1.4.2 Les mécanismes sous-jacents à l'efficacité de RSH.....	51
1.4.3 Quel niveau d'altitude adopter ?.....	52

1.5 But général de la thèse.....	53
1.5.1 Buts et hypothèses des études constituant cette thèse.....	54
<b>2. Résumé des résultats expérimentaux.....</b>	<b>55</b>
2.1 Validation d'un test d'effort spécifique au tennis (TEST) avec frappes de balle chez des joueurs élite.....	56
2.1.1 Précision et reproductibilité d'une nouvelle machine lance-balles ...	56
2.1.2 Fiabilité et spécificité de TEST .....	56
2.2 Analyse et applications pratiques des données issues de TEST.....	57
2.2.1 TEST : Etude de cas d'un joueur élite .....	57
2.2.2 Adaptations techniques pendant TEST chez des joueurs de tennis élite.....	58
2.2.3 Vers un entraînement polarisé en tennis? Intérêt d'une approche combinant évaluations techniques et physiologiques lors d'un nouveau test incrémental sur le terrain.....	59
2.2.4 Comparaison des données techniques et physiologiques mesurées pendant TEST entre des joueuses professionnelles classées à la WTA et des juniors classés à l'ITF junior.....	60
2.3.5	
2.3 L'utilisation de la nouvelle méthode RSH améliore les paramètres spécifiques de la performance au tennis.....	62
2.3.1 Effets d'un microcycle de répétition de sprints en hypoxie chez un jeune joueur professionnel.....	62
2.3.2 Effets de la répétition de sprint en hypoxie chez des joueurs de tennis bien entraînés.....	63
<b>3. Discussion.....</b>	<b>65</b>
<b>4. Conclusions et perspectives.....</b>	<b>76</b>
<b>5. Références.....</b>	<b>81</b>
<b>Article 1- Accuracy and Reliability of a New Tennis Ball Machine.....</b>	<b>91</b>
<b>Article 2- On the Use of a Test to Exhaustion Specific to Tennis (TEST) with Ball Hitting by Elite Players.....</b>	<b>98</b>
<b>Article 3- Stress test specific to tennis (Test): Case study of an elite player.....</b>	<b>114</b>
<b>Article 4- Evaluation et développement des ressources physiologiques du joueur de tennis.....</b>	<b>120</b>
<b>Article 5- Technical alterations during an incremental field test in elite male tennis players.....</b>	<b>153</b>
<b>Article 6- Towards polarized training in tennis? Usefulness of combining technical and physiological assessments during a new incremental field test.....</b>	<b>165</b>
<b>Article 7- Shock microcycle of Repeated-sprint training in hypoxia and tennis performance: a case study in a rookie professional player.....</b>	<b>171</b>

<b>Article 8- Effects of Repeated Sprint in Hypoxia on tennis-specific performance in well-trained players.....</b>	<b>186</b>
<b>Article 9- Physiological and technical differences between junior and professional female tennis players during an incremental field test.....</b>	<b>210</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>237</b>

## Résumé

Lors de la pratique du tennis par des joueurs de haut niveau, les limites de la performance sont d'origine technico-tactiques, psychologiques et/ou physiologiques, avec des incidences réciproques. En s'appuyant sur une analyse de l'activité spécifique plus aboutie et des évolutions technologiques, nous pouvons envisager le développement de nouveaux outils afin de contribuer à l'amélioration de la capacité de performance. Le but de ce travail est de disposer d'un nouvel outil d'évaluation davantage connectée aux paramètres qui font la performance de haut niveau, et de valider les effets d'une nouvelle technique d'entraînement. Nous avons dans un premier temps évalué la fiabilité d'une nouvelle technologie de lance-balles avant de l'utiliser pour un nouveau test d'effort spécifique au tennis. L'analyse des données récoltées a fait émerger des points-clés inhérents à l'expression des ressources à un haut niveau de pratique : a) chez les hommes, on observe une incidence de la difficulté de l'effort relative sur le niveau d'efficacité technique, b) chez les femmes, la transition junior – circuit professionnel est marquée par un potentiel aérobie supérieur et un revers plus performant, notamment en vitesse de balle. Afin de développer les capacités physiques des joueurs, la mise en œuvre d'un cycle de répétitions de sprints en hypoxie (RSH) aboutit à une meilleure résistance à l'effort, et d'un gain de précision dans les frappes aux intensités difficiles. Les effets de cette méthode d'entraînement sur le potentiel de performance au tennis ont été déterminés à partir du test d'effort validé en amont. Après avoir vérifié l'avantage de RSH pour des joueurs de tennis, nous avons fait évoluer la méthode en y ajoutant des frappes de balle.

La mise à disposition de ces nouveaux outils d'entraînement ouvre de nouvelles possibilités pour adapter les principes de l'entraînement polarisé au tennis, avec des applications liées à l'utilisation de la machine lance-balles et/ou des données relatives au test d'effort, ainsi qu'une méthode très sollicitante en hypoxie. Ainsi, on peut mieux combiner ou faire cohabiter le développement technico-tactique avec les autres « piliers » de la performance. Ces nouveaux procédés ouvrent la voie d'une pratique potentiellement plus efficace sur le niveau de performance, ainsi que sur des aspects plus fondamentaux tels que la prophylaxie en rationalisant la méthode d'entraînement.

## **Abstract**

When playing tennis by high level players, the performance limits are of technical, tactical, psychological and / or physiological origin, with reciprocal implications. Based on an analysis of the activity combined with technological changes, we are aiming the development of new methods to improve performance capacity. The purpose of this work is to design and valid a new field test in order to determine the effectiveness of a new training technique. We first validated the reliability of a new ball machine technology, before using it to validate a new tennis-specific stress test. The analysis of the data obtained lead to determine key points linked to the expression of the resources of men and women at elite level: a) in male players, we observe an impact of the fatigue on the technical alteration, b) in female, the transition junior - professional circuit is marked by a higher aerobic potential and a more efficient backhand, especially in ball speed. Then, we realized that after a cycle of repeated sprints in hypoxia (RSH), Greater improvement in physical and parameters was observed after only 5 sessions of RSH vs. RSN in tennis players. With a low hypoxic dose RSH improved total time to exhaustion and time to the second ventilatory threshold in a tennis-specific aerobic test. Repeated-sprint training in hypoxia could provide an effective strategy as compared with similar training in normoxia to improve performance and to delay technical impairments near exhaustion in tennis players.

After checking the RSH advantage for tennis players, we have changed the method by including ball strokes.

The validity of these new training techniques opens up new possibilities for adapting the principles of polarized tennis training, with applications related to the use of the ball machine and/or stress test data, as well as a very demanding training design in hypoxia. Thus, we can better combine tactical-technical development with other "pillars" of performance. These new methods open the way for a potentially more effective practice on the level of performance, as more fundamental aspects such as prophylaxis by streamlining the training method.

## **Index des abréviations**

**API** : Aptitude physiologique individuelle

**ATP** : Association of Tennis Professionals

**ATP-PCr** : Adénosine TriPhosphate – Phosphocréatine

**Bpm** : Battement par minute

**CV** : Coefficient de variation (%)

**d** : Distance

**ITF**: International Tennis Federation

**FC** : Fréquence Cardiaque

**FC<sub>max</sub>** : Fréquence cardiaque maximale

**FR** : Fréquence respiratoire

**[La]** : Concentration de lactates sanguins (mmol. L<sup>-1</sup>)

**Min** : Minute

**NIRS** : Near –Infrared Spectroscopy (spectroscopie dans le proche infrarouge)

**O<sub>2</sub>** : Oxygène

**PCr** : Phosphocréatine.

**PMA** : Puissance Maximale Aérobie

**RS** : Répétition de sprints

**RSA** : Habileté à répéter des sprints

**RSD** : En anglais, « Relative Standard Deviation », c'est le coefficient de variation (en %)

**RPE** : En anglais, Rating of Perceived Exertion, soit Difficulté de l'effort perçue selon l'échelle de Borg.

**RSH** : Répétition de Sprints en Hypoxie

**RSN** : Répétition de sprints en Normoxie

**SV1** : 1<sup>er</sup> Seuil Ventilatoire ; **SV2** : 2<sup>ème</sup> Seuil Ventilatoire

**TEST** : Test d'Effort Spécifique au Tennis

**ṠCO<sub>2</sub>** : débit de rejet de dioxyde de carbone par la ventilation.

**ṠE** : Débit d'air ventilé (L.min<sup>-1</sup>)

**VMA** : Vitesse Maximle Aérobie

**ṠO<sub>2</sub>** : Consommation d'Oxygène (mL.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>)

**ṠO<sub>2max</sub>** : Consommation maximale d'Oxygène (mL.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>)

**QR** : Quotient respiratoire (ṠCO<sub>2</sub> / ṠO<sub>2</sub>)

**SD** : En anglais, « Standard Deviation », c'est l'écart-type.

**Sec** : s

**TRJ** : Temps réel de jeu

**WTA** : Women Tennis Association

## Liste des figures des chapitres 1 à 4 inclus

<b>Figure 1.</b> Temps réel de jeu (TRJ) et durée des points.....	21
<b>Figure 2.</b> La répartition des points en fonction de leur durée.....	22
<b>Figure 3.</b> Répartition des points en fonction de leur nombre de frappe.....	23
<b>Figure 4.</b> Représentation schématique du modèle d'optimisation de l'entraînement adapté aux spécificités de la discipline sportive.....	31
<b>Figure 5.</b> Schéma du « On-Court » Endurance Testing in Tennis (Smekal et al., 2000).....	37
<b>Figure 6.</b> Configuration du court pour le test d'effort progressif conçu pour les joueurs de tennis, d'après Girard et al. (2006).....	40
<b>Figure 7.</b> Exemple chez un sujet de la consommation d'Oxygène (ligne de points) et évolution par paliers (« stage ») pendant SET-test (Baiget et al., 2017).....	44
<b>Figure 8.</b> Panorama actualisé des différentes méthodes d'entraînement en Altitude/Hypoxie utilisés par une variété d'athlètes .....	46
<b>Figure 9.</b> Mécanismes sous-jacents à l'efficacité de RSH.....	52
<b>Figure 10.</b> Canevas des buts et hypothèses des études ayant donné lieu à publication.....	54
<b>Figure 11.</b> Impacts de balle mesurés avec « Hawk-Eye » lors de l'expérimentation (e.g., 11 <sup>ème</sup> palier, 26 balles.min <sup>-1</sup> ).....	56
<b>Figure 12.</b> Relations entre le classement des joueurs (ranking de 1 à 27) avec $\dot{V}O_{2max}$ (A), et $\dot{V}O_2$ à SV2 ( $\dot{V}O_{2SV2}$ ). Les lignes pointillées et les pleines représentent respectivement TEST et le 20mSRT.....	57
<b>Figure 13.</b> Changements de vitesse de balle (BV, A), précision (BA, B), et performance technique (TP, C) en fonction de l'intensité de l'exercice ( $\% \dot{V}O_{2max}$ ), en coup droit (pointillés) et en revers (traits continus). La flèche verticale indique SV2.....	59
<b>Figure 14.</b> Zones d'intensité et variations de l'indice de performance tennistique (TP) (ligne continue) et de la lactatémie sanguine (ligne pointillée) en fonction de l'intensité de l'exercice ( $\%$ de $\dot{V}O_{2max}$ ).....	60
<b>Figure 15.</b> Comparaison des classements ATP des adversaires (A) et gain de points ATP par le participant (B) avant (Pre) et après (+21 jours) une période de 14 jours d'entraînement qui intègre 6 séances RSH.....	62
<b>Figure 16.</b> Comparaison Pre vs Post entraînement et RSH vs. RSN, à travers les évolutions des vitesses de balle (BV) (A), de la précision (BA) (B) et de la performance technique (TP = BA x BV) (C). .....	64
<b>Figure 17.</b> Relation $\dot{V}O_{2max}$ – Classement ATP. ....	69
<b>Figure 18.</b> Bilan des résultats et informations les plus significatifs, dans l'ordre des publications, de 1 à 9.....	75



## Liste des figures en Annexes

<b>Figure 19.</b> déroulement du protocole expérimental (A). Protocole d'entraînement de 12 jours (B) .....	237
<b>Figure 20.</b> Fiche de recrutement de l'étude RSHTEN.....	240
<b>Figure 21.</b> Fiche de présentation de l'étude RSHTEN.....	240

## Liste des tableaux des chapitres 1 à 4 inclus

<b>Tableau 1.</b> Structure temporelle des matchs de tennis.....	20
<b>Tableau 2.</b> Caractéristiques des déplacements lors des matchs de l'Australian Open.....	24
<b>Tableau 3.</b> Revue de littérature de la Fréquence cardiaque (FC), Lactatémie ([La]) et difficulté de l'effort perçue (RPE) en tennis.....	25
<b>Tableau 4.</b> Revue de Littérature de la consommation d'oxygène ( $\dot{V}O_{2max}$ ) évaluée au laboratoire et la consommation d'oxygène ( $\dot{V}O_2$ ) mesurée pendant le jeu en tennis. Adapté et complété de (Girard, 2006). .....	27
<b>Tableau 5.</b> Caractéristiques des vitesses du service et des coups de fond de court lors de l'Open d'Australie. ....	30
<b>Tableau 6.</b> Evolution des méthodes d'entraînement en hypoxie à travers le temps.....	45
<b>Tableau 7.</b> Synthèse des études publiées sur RSH. ....	50
<b>Tableau 8.</b> Paramètres de la performance technique mesurés pendant TEST chez un joueur élite.....	58
<b>Tableau 9.</b> Modèle de protocoles d'entraînement spécifique sur le court visant à optimiser la capacité aérobie et l'efficacité technique chez les joueurs de tennis de haut niveau.....	60
<b>Tableau 10.</b> Niveau physique avant (Pre) et après (Post) (+3 jours et +21 jours) une période de 14 jours d'entraînement qui intègre 6 séances RSH.....	61

# ***Chapitre 1***

## ***Introduction***

# 1. Introduction

## 1.1. Introduction générale : la performance de haut niveau au tennis et ses problématiques.

Le succès au tennis dépend largement des qualités technico-tactiques du joueur mais requiert également une interaction complexe entre les qualités physiques (i.e. force, vitesse, coordination, souplesse, endurance, agilité) et les systèmes de fourniture d'énergie (aérobie et anaérobie) (Fernandez-Fernandez et al. 2006). Afin de maximiser l'efficacité de l'entraînement physique du joueur de tennis, ses objectifs et contenus doivent être définis objectivement au regard de la charge de travail soutenue en match. L'analyse de la structure du jeu (i.e. durée des échanges, des matchs; ratio exercice : récupération), des réponses physiologiques (e.g. FC et [La]) et des principaux déterminants de la performance (cf. Chapitre 1.2) sont des éléments à considérer pour définir le programme d'entraînement et obtenir des adaptations spécifiques. Cette approche doit être individualisée, prenant en compte les caractéristiques propres de chaque joueur; une approche dont l'un des précurseurs est le Dr. Talbot (Talbot, 1990). Il est courant d'avoir recours à différents tests afin d'évaluer les qualités physiques d'un joueur. Cette objectivation du potentiel physique du joueur doit permettre, à partir de feedbacks objectifs, des ajustements du contenu (i.e. volume et intensité) de l'entraînement à plus ou moins long terme et un maintien de sa motivation en fixant des objectifs réalistes au regard de son état de forme.

L'entraînement physique des joueurs de tennis doit notamment contribuer à améliorer leur capacité à répéter des efforts à haute intensité et à récupérer rapidement dans les phases de repos (Reid, Morgan, & Whiteside, 2016). Les stratégies d'entraînement physique doivent être adaptées à un calendrier de compétitions chargé (Reid & Schneiker, 2008). Afin d'optimiser le peu de temps disponible pour développer les qualités physiques requises, la méthode RSH apparaît potentiellement intéressante pour le tennis en raison de ses effets sur RSA (Brocherie, Girard, Faiss, & Millet, 2017), cette qualité physique étant considérée importante pour les sports intermittents tels que le tennis (Fernandez-Fernandez, Sanz-Rivas, Kovacs, & Moya, 2015; Girard, Mendez-Villanueva, & Bishop, 2011). Cet objectif doit être associé à un niveau de  $\dot{V}O_{2max}$  reconnu comme un élément déterminant de la performance au tennis (Banzer, Thiel, Rosenhagen, & Vogt, 2008). Même si Kovacs minore l'incidence de la valeur de  $\dot{V}O_{2max}$  dans ses revues de question (Kovacs, 2006, 2007), nous retenons qu'il est possible d'améliorer la capacité à enchaîner des efforts intenses et courts grâce à un bon développement de la capacité oxydative des muscles sollicités (Glaister, 2005). La méthode qui combine des gains sur RSA et la  $\dot{V}O_{2max}$  reste à être optimisée et validée au tennis. La méthode RSH ayant déjà montré des effets sur la  $\dot{V}O_{2max}$  (Puype, Van Proeyen, Raymackers, Deldicque, & Hespel, 2013), ainsi que

sur la PMA (Galvin, Cooke, Sumners, Mileva, & Bowtell, 2013; Jones, Hamilton, & Cooper, 2015), l'évaluation de ces paramètres ajoutés à RSA selon des modalités orientées tennis pourraient constituer un atout considérable pour valider un niveau de préparation physique adapté à la performance sportive à réaliser.

## **1.2. Caractéristiques du tennis : Une Activité intermittente**

L'analyse de l'activité est l'une des étapes préalables à toute proposition de planification des contenus d'entraînement (Platonov, 1988). Le tennis est une activité caractérisée par une suite discontinue d'efforts brefs et intenses entrecoupés de périodes de récupération plus ou moins complètes (Fernandez, Mendez-Villanueva, & Plum, 2006; Kovacs, 2006; Lees, 2003). Il s'agit donc d'une activité intermittente qui nécessite des qualités d'endurance, ainsi que des capacités d'explosivité musculaire. Tout joueur doit développer, outre des qualités techniques, tactiques et psycho-cognitives, des qualités physiques (Lees, 2003). Le joueur mobilise intensément ses membres inférieurs et supérieurs afin de frapper la balle avec une recherche permanente de précision et d'efficacité. Afin de mieux cerner les motivations relatives au développement d'un test d'effort et de nouvelles méthodes d'entraînement, nous questionnerons la nature de l'activité tennis en compétition dans un premier temps.

L'analyse de la performance en compétition est aujourd'hui en plein essor grâce au développement de nouvelles technologies. Les recherches appliquées analysent les matchs dans la perspective de dégager des tendances et des modèles chez les joueurs de l'élite et ainsi apporter une connaissance utile aux joueurs en devenir et aux entraîneurs. L'analyse des matchs aide à réduire l'activité complexe du tennis à des modèles identifiant les facteurs critiques qui contribuent à la haute performance et à la réussite dans cette activité. Depuis peu, le système Hawk-Eye permet l'identification des vitesses de balles.

## 1.2.1 Structure temporelle des matchs de tennis.

**Tableau 1.** Structure temporelle des matchs de tennis, adapté et complété de (Girard, 2006)

Référence	Niveau	Sexe	Nombre	D.P (s)	TRJ (%)	Ratio E-R	Surface
Bernardi et al (1998)	Régional	M	7	8.3 (3.7)	-	-	TB
	Régional €	M	2	4.8 (0.4)	21.0 (5.5)	-	TB
	Régional ¥	M	3	8.2 (1.2)	28.6 (4.2)	-	TB
	Régional *	M	2	15.7 (3.5)	38.5 (4.9)	-	TB
Chandler (1990)	International	M	2	-	-	1 : 2.5	Dur
Christmass et al. (1998)	Régional	M	8	10.2	23.3 (1.4)	1 : 1.7	Dur
Christmass et al. (1995)	Régional	M	8	10.2 (0.3)	23.3 (1.4)	1 : 1.7	Dur
Dansou et al. (2001)	Régional	M	10	-	-	-	-
Docherty (1982)	National	M	14	4.3 (0.6)	16.7	-	Dur
	Régional	M	-	4.2 (0.9)	-	-	Dur
	National	-	-	4.0 (0.4)	-	-	Dur
Dupuy et al. (2007)	International	M	43	8.5	21	1 : 2.7	TB
		F	45	8	22.5	1 : 2.5	TB
Elliott et al. (1985)	National	M	-	10	26.5 (3.5)	1 : 3.1	Dur
Fernandez-Fernandez et al. (2007)	International	F	8	8.2 (5.2)	21.9 (3.8)	-	Dur
Fernandez-Fernandez et al. (2008)	International	F	8	7.2 (5.2)	21.6 (6.1)	1 : 2.1	TB
Fernandez et al. (2005)	International	M	8	7.5 (7.3)	18.2 (5.8)	1 : 2.2	TB
Girard et Millet (2004)	Régional	M	7	7.2 (1.7)	-	-	TB
		-	-	5.9 (1.2)	-	-	Dur
Kovacs (2004)	International	M	-	6.0	-	1 : 2.6	Dur
Mendez-Villanueva (2010)	International	M	8	7.5 (7.3)	21.5 (4.9)	-	TB
Misner et al (1980)	Régional	M	-	-	23.6	1 : 4.4	Dur
Morantes et Brotherhood (2006)	International	M	26	6.4 (1.4)	17.5 (2.4)	1 : 4.4	Dur
		M	26	5.2 (0.8)	20.5 (2.1)	1 : 4.1	Herbe
		F	18	7.0 (1.3)	20.2 (2.1)	1 : 4.1	Dur
		F	18	5.6 (0.6)	21.1 (1.6)	-	Herbe
Morgans et al (1987)	Régional	M	17	-	30.5	-	-
O'Donoghue et Liddle (1998)	International	F	10	8.1 (6.1)	21.3	-	TB
		F	11	6.0 (4.3)	16.8	-	Herbe
		M	9	5.6 (4.6)	15.0	-	TB
		M	14	3.7 (2.5)	11.5	-	Herbe
O'Donoghue et Ingram (2001)	International	M et F	13 – 32	6.3 (1.8)	-	-	Dur
		M et F	-	7.7 (1.7)	-	-	TB
		M et F	-	4.3 (1.6)	-	-	Herbe
Reilly et Palmer (1994)	International	M et F	-	5.8 (1.9)	-	1 : 2.5	Dur
Richers (1995)	Régional	M	8	5.3 (1.0)	27.9 (3.9)	-	Dur
	National	M	22	7.6 (6.7)	-	-	TB
Schmitz (1990)	-	-	-	8.0 (7.4)	-	-	Dur
Seliger et al. (1973)	-	M	16	4.3 (2.7)	-	-	Herbe
Smekal et al. (2001)	National	M	16	7.2 (0.7)	19.0 (2.8)	-	TB
Weber et al. (1978)	National	M	20	-	41.1	1 : 3.4	-
	National	M	18	6.4 (4.1)	16.3 (6.6)	-	TB
	National	M	18	5.1	16.4	-	Dur

DP : durée moyenne d'un point ; TRJ : temps réel de jeu ; Ratio E-R : ratio exercice –récupération ; TB : terre battue ; - : variable non étudiée ; M : masculin ; F : Féminin ; € : serveur-volleyeur ; ¥ : attaquant de fond de court ; \* : défenseur de fond de court

## 1.2.2 Temps réel de jeu et durée des points.

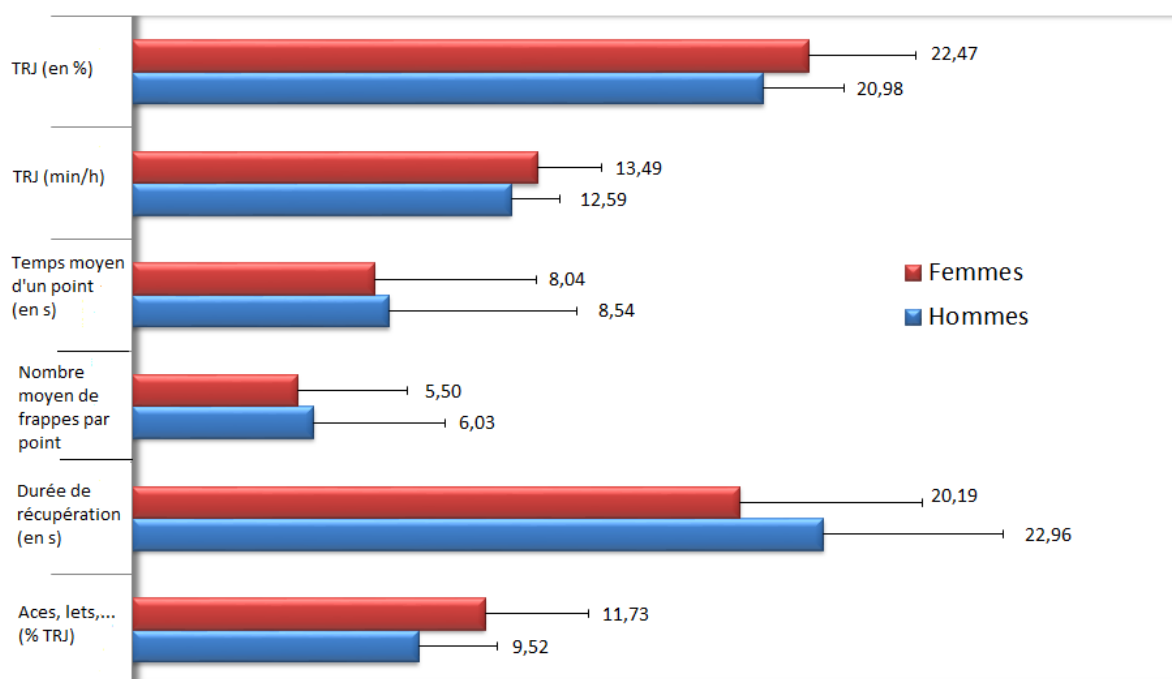
L'indicateur le plus largement utilisé pour décrire la durée de l'effort dans les sports à caractère intermittent (e.g. sport de raquette, sports collectifs) est le temps réel de jeu. Il correspond à la durée pendant laquelle la balle est effectivement en jeu (Talbot, 1990) et il est classiquement de l'ordre de 10 à 30% en tennis (cf. tableau 1). Dans les sports d'opposition ou les activités duelles comme les sports de raquette, ce sont les caractéristiques de l'adversaire qui conditionnent le plus fortement le style de jeu pratiqué par le joueur. Plusieurs études (Bernardi M, 1998; Dupuy & Fargeas-Gluck, 2007; Talbot, 1990) ont mis en évidence trois styles de jeu

développés préférentiellement par les joueurs de tennis. Chacun d'eux possède une fourchette personnelle de temps réel de jeu par heure, au cours de laquelle il développe son meilleur tennis en se fatiguant le moins possible ; c'est l'aptitude physiologique individuelle (API), (Talbot, 1990).

Dupuy & Fargeas-Gluck (2007) ont proposé une actualisation de ces données portant sur l'analyse complète de **88 matchs des Internationaux de France 2006**.

Le Temps Réel de Jeu (TRJ) sur terre battue représente en moyenne 22.5 % de la durée totale du match chez les femmes et 21 % chez les hommes. **Les changements de côté et les temps de récupération après chaque point représentent alors plus de 75 % de la durée d'un match.**

Tous ces résultats sont présentés dans la figure récapitulative suivante :

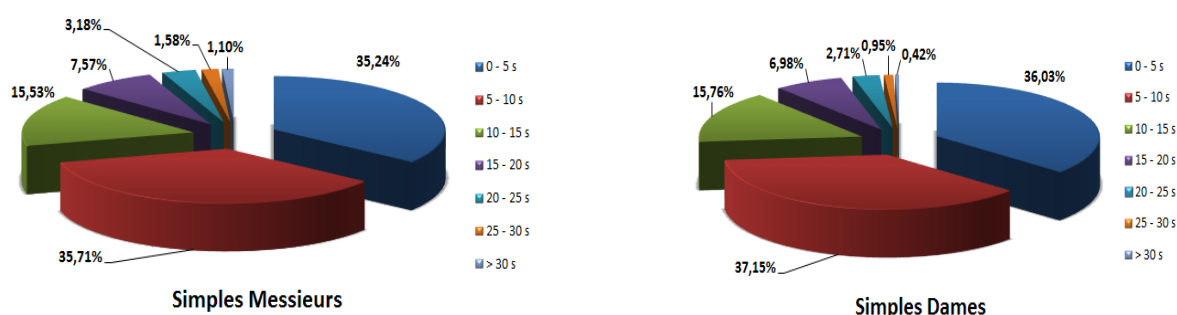


**Figure 1.** Temps réel de jeu (TRJ) et durée des points (Dupuy & Fargeas-Gluck, 2007).

Nous pouvons donc constater que le temps réel de jeu par match est plus important chez les femmes que chez les hommes. La différence s'explique par des temps de récupération plus courts chez les femmes. La durée moyenne d'un point et le nombre moyen de frappes sont à peu près identiques chez les hommes et chez les femmes sur terre-battue.

### 1.2.3 La répartition du nombre de points en fonction de leur durée et du nombre de frappes.

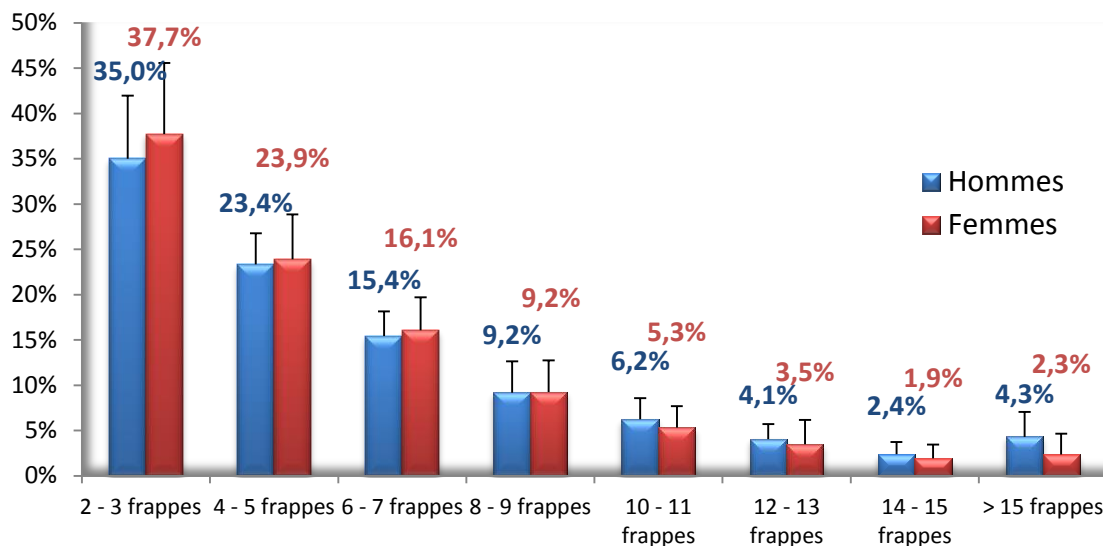
Sur terre-battue, l'écart-type de la durée moyenne d'un point reflète la très grande variabilité de la durée d'un point à un autre 5.4 s pour les femmes et 6.2 s pour les hommes (Dupuy & Fargeas-Gluck, 2007). Il est alors intéressant de proposer une répartition des points en fonction de leur durée respective. L'échange le plus long a été enregistré à 38.1 s pour les femmes (Schnyder vs Krajicek) et 58.1 s pour les hommes (Monfils vs Murray). Cependant nous constatons que plus de 70 % des points ont une durée comprise entre 0 et 10 s.



**Figure 2.** La répartition des points en fonction de leur durée (Dupuy & Fargeas-Gluck, 2007).

Certaines différences peuvent être observées entre simple dames et simple messieurs. Le pourcentage des points de moins de 15 s est légèrement plus important chez les femmes que chez les hommes (88,94% vs 86,48%). Le nombre moyen de frappes réalisées au cours d'un échange est de 5.5 frappes pour les femmes et de 6 frappes pour les hommes. La répartition des points en fonction du nombre de frappes est représentée dans la [figure 3](#).

Les 14 000 points comptabilisés (6 000 chez les femmes et 8 000 chez les hommes) dans cette étude nous permettent d'estimer le temps moyen entre deux frappes successives durant un échange. **Ce temps « inter-frappe » est de 1.46 s pour les femmes et de 1.42 s pour les hommes.** Le pourcentage de points de moins de 10 frappes est plus important chez les femmes que chez les hommes.



**Figure 3.** Répartition des points en fonction de leur nombre de frappe (Dupuy & Fargeas-Gluck, 2007).

#### 1.2.4. Tennis et jeu de jambes

Il a été estimé que, pendant un match de tennis (au meilleur des trois sets), chaque joueur réalise en moyenne 300 à 500 mouvements explosifs (Deutsch, Deutsch, & Douglas, 1988). Le déplacement moyen est de 3 m par coup joué et de 8 à 12 m lors d'un point (Ferrauti, Bergeron, Plum, & Weber, 2001). Même si les moments où le joueur atteint sa vitesse de pointe lors d'un échange sont rares, voire inexistantes, la capacité d'accélération pour faire un sprint sur des distances allant jusqu'à 12 mètres est importante. Environ 10% de toutes les frappes faisaient intervenir un sprint en direction de la balle sur terre battue (Ferrauti, Plum, Busch, & Weber, 2003).

Le nombre de changements de direction dans un point est de  $2,3 \pm 1,4$  (chez des joueuses de haut niveau juniors sur Greenset) (Fernandez-Fernandez, Mendez-Villanueva, Fernandez-Garcia, & Terrados, 2007). Certaines études ont fait état d'une moyenne de quatre changements de direction par point sur court en dur, même si ce chiffre peut varier en fonction de la surface de jeu (Deutsch et al., 1988; Fernandez-Fernandez et al., 2007; Murias, Lanatta, Arcuri, & Laino, 2007). Le nombre de coups joués lors d'un point est de l'ordre de  $2,7 \pm 2,2$  (de 1 à 17, chez des joueurs professionnels, sur terre battue) (Mendez-Villanueva, Fernandez-Fernandez, Bishop, Fernandez-Garcia, & Terrados, 2007). Il dépend du style de jeu, du type de balle utilisé ou encore de la surface de jeu et du sexe (Cooke & Davey, 2005; Smekal et al., 2001). Près de 80% des frappes sont réalisées dans un périmètre n'excédant pas une zone de 2,5 m par rapport à la position de remplacement au centre du terrain (Ferrauti, Weber, & Wright, 2003). La fréquence de frappe est de l'ordre de 45 coups par minute (Smekal et al., 2001).

Plus récemment, en 2011, à Roland Garros, une équipe franco-canadienne a analysé 35 matchs (20 féminins (WTA ranking moyen : 70), 15 masculins (ATP ranking moyen : 44)) pour déterminer les zones de frappes et de déplacement, ainsi que la vitesse et distance totale parcourue (Dupuy, Breque, Fargeas-Gluck, & Valle, 2012). Dans les temps de jeu, les temps de sprint ( $> 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) s'élève à 16.4% chez les hommes à Roland Garros, et à 10.8% pour les



femmes. La distance totale parcourue est  $2247.5 \pm 1116.5$  m chez les femmes, et  $5083.3 \pm 1788$  m pour les hommes. De plus, ils ont identifié que 78.8% des frappes étaient réalisés derrière la ligne de fond de court chez les femmes, et 80.2% chez les hommes.

En 2016, une équipe australienne a publié une analyse des caractéristiques du jeu lors du grand chelem australien (Reid, Morgan, & Whiteside, 2016). Ils ont suivi 197 joueurs (102 hommes et 95 femmes) avec le système Hawk-Eye, sur un seul match pour des raisons méthodologiques.

**Tableau 2.** Caractéristiques des déplacements lors des matchs de l’Australian Open (Reid et al., 2016).

	Homme Moy $\pm$ SD	Femme Moy $\pm$ SD	P	ES
Distance parcourue par match (m)	2110 $\pm$ 839	1232 $\pm$ 440	< 0.001	1.30
Distance parcourue par set (m)	572 $\pm$ 152	553 $\pm$ 172	0.397	0.12
Vitesse moyenne de déplacement (m.s <sup>-1</sup> )	3.68 $\pm$ 0.41	3.43 $\pm$ 0.48	< 0.001	0.55
Distance parcourue points gagnés (m)	10.24 $\pm$ 2.44	10.55 $\pm$ 3.08	0.682	0.11
Distance parcourue points perdus (m)	8.07 $\pm$ 1.93	7.57 $\pm$ 2.20	0.042	0.24

Moy : Moyenne ; SD : Ecart-type ; m : mètre ; P : indice de significativité statistique ; ES : Effect Size.

### **1.2.5. Nature de l’effort spécifique au tennis : réponses physiologiques et métaboliques pendant le jeu**

Afin de pouvoir relativiser l’analyse de l’activité en fonction de l’âge et du niveau, nous proposons le tableau 3 qui synthétise la littérature disponible.

**Tableau 3.** Revue de littérature de la Fréquence cardiaque (FC), Lactatémie ([La]) et difficulté de l'effort perçue (RPE) en tennis. Adapté et complété de Girard (2006).

Référence	Niveau	Sexe (Nombre)	FC (bpm)	FC (% FC max)	[La] mmol L <sup>-1</sup>	RPE	Surface
Bernardi et al. (1991)	National	M (10)	145 (13)	61	2.3 (1.2)	-	Dur
Bernardi et al. (1998)	Régional €	M (2)	121 (15)	64	-	-	TB
	Régional ¥	M (3)	153 (6)	80	-	-	TB
	Régional *	M (2)	165 (7)	83	-	-	TB
Blackwell et al. (2004)	Régional	M et F (20)	153 (17)	-	-	-	-
	Régional	M et F (20)	157 (18)	-	-	-	-
Christmass et al. (1995)	Régional	M (8)	155	86 (1)	2.1 – 5.9	-	Dur
Dansou et al. (2001)	Régional	M (10)	140 (5)	74 (2)	3.3 (0.1)	-	-
Docherty (1982)	National	M (14)	137	68-70	-	-	-
Elliott et al. (1985)	Régional	M (8)	150	80	-	-	Dur
Fernandez-Fernandez et al. (2007)	International J	F (8)	161 (5)	-	2 (0.8)	-	Dur
Fernandez-Fernandez et al. (2008)	International	F (8)	-	-	2.2 (0.9)	12.2 (2.4) &	Dur
Fernandez et al. (2005)	International	M (6)	147 (15)	-	4.0 (1.1)	12.5 (2.1) &	TB
Fernandez et al. (2005)	International	M (8)	-	-	3.8 (2.0)	13.0 (2.1) &	TB
Ferrauti (1997)	National	M et F	140 (15)	-	1.5 (0.7)	-	-
Ferrauti et al. (1997)	Régional	M et F (16)	141 (14)	-	1.6 (0.7)	-	Dur
Ferrauti et al. (1998)	National	M et F (12)	-	-	1.5 (0.6)	-	-
Ferrauti et al. (2001)	National	M et F (12)	140 (15)	-	1.5 (2.0)	-	Dur
Friedman et al. (1984)	-	M (13)	130	80	-	-	-
Girard et Millet (2004)	Régional j	M (7)	182 (12)	90 (5)	3.1 (1.1)	-	TB
		M	173 (17)	86 (6)	2.4 (0.5)	-	Dur
Kindermann et al. (1981)	-	M (12)	146 (20)	-	2.0 (0.5)	-	-
Marks et al. (2004)	Régional	M (18)	-	-	-	13 (2)	Dur
Mendez-Villanueva et al. (2007)	International	M (8)	-	-	3.8 (2.0)	14.3 (1.2) &	TB
Mendez-Villanueva et al. (2010)	International	M (8)	-	-	4.4 (2.2)	13.9 (1.9) &	TB
Misner et al. (1980)	Régional	M	142	63	-	-	TB
Mitchell et al. (1992)	Régional	M et F (12)	140-155	-	-	1.6 – 2.6 \$	Dur
Morgans et al. (1987)	Régional	M (17)	154	61	-	-	-
Novas et al. (2003)	Tous niveaux	F (24)	146 (20)	-	-	4.0 (1.0) µ	Dur
Paruit-Portes (1982)	National	M (7)	141	75	-	-	-
Reilly et Palmer (1994)	Régional	M (8)	146 (19)	76	2.0 (0.4)	-	Dur
Schmitz (1990)	-	M (16)	143 (12)	-	2.6 (1.0)	-	TB
Schneider et al. (2001)	National	F (2)	135	70	3.8	-	-
Seliger et al. (1973)	National	M (16)	143 (14)	60	-	-	-
Smekal et al. (2001)	National	M (20)	151 (19)	-	2.1 (0.9)	-	TB
Therminarias et al. (1991)	Régional	F (19)	-	-	1.8	-	-
Weber et al. (1978)	National	M (18)	147 (10)	-	2.2	-	Dur

Les valeurs sont données en tant que moyenne (écart-type) ; FC, fréquence cardiaque ; [La], lactatémie ; RPE, difficulté de l'effort perçue ; TB, terre battue ; -, variable non étudiée ; M, Masculin ; F, Féminin ; j, sujets jeunes ; µ, échelle RPE 1-10 ; &, échelle RPE 6-20 ; \$, échelle RPE 1-3 ; €, serveur-volleyeur ; ¥, attaquant de fond de court ; \*, défenseur de fond de court.

### 1.2.5.1 Fréquence cardiaque.

La FC reste pendant toute la partie à des valeurs comprises entre 140 et 160 bpm (60-80% FC<sub>max</sub>, cf. Tableau 2, p.17). Lors des points particulièrement longs et éprouvants, la FC peut atteindre des niveaux de 190-200 bpm (Bergeron et al., 1991; Fernandez et al., 2006; Kovacs, 2007), reflet d'une haute intensité proche de 100% de FC<sub>max</sub> (Fernandez et al., 2006; Kovacs, 2007). Des valeurs de FC supérieures ont été rapportées pour le serveur, qu'il s'agisse de tennis féminin ou masculin en situation de compétition (Fernandez-Fernandez et al., 2007; Mendez-Villanueva et al., 2007). Les plus hautes valeurs de FC observées sur les jeux de service pourraient s'expliquer par un plus haut stress psychologique et une élévation de l'activité sympathique liée au besoin de gagner ces jeux (Helsen & Bultynck, 2004).

### 1.2.5.2 Consommation d'oxygène ( $\dot{V}O_2$ )

D'une manière générale, l'intensité moyenne d'un match de tennis (60-70%  $\dot{V}O_{2max}$ , cf. tableau 3) est relativement modeste. La  $\dot{V}O_2$  atteint près de 60% de la  $\dot{V}O_{2max}$  pendant 80% de la durée du match (Dansou, Oddou, Delaire, & Therminarias, 2001). En dépit de son caractère intermittent, le tennis induit une dépense aérobie modérée mais prolongée.

Des différences modérées de  $\dot{V}O_2$  enregistrées sur le terrain lors des matchs de tennis ont été observées entre des joueurs de niveau régional ou national. Les études visant à déterminer le profil physiologique d'un match de tennis et incluant des joueurs de classe mondiale (professionnels) sont très peu nombreuses. En comparant l'intensité d'un match de tennis et d'un exercice de course à pied réalisé à la même intensité relative (% $\dot{V}O_{2max}$ ), Ferrauti et al. (2001) ont montré que la pratique du tennis induisait des valeurs plus élevées de FC, [La], concentration en glucose sanguin et quotient respiratoire. Les concentrations urinaires en adrénaline et noradrénaline étaient également supérieures après le match de tennis. Ces résultats suggèrent que l'oxydation des hydrates de carbone est la source d'énergie préférentielle lors de matchs de tennis réalisés à une intensité moyenne proche de 55%  $\dot{V}O_{2max}$ . De plus, l'activité glycolytique et orthosympathique plus élevée lors des matchs de tennis est un point important à prendre en compte pour construire et orienter les programmes d'entraînement mais également pour moduler son régime alimentaire en période compétitive.

La réponse cardiovasculaire de joueurs adultes de niveau club a été analysée lors de 6 situations d'entraînement spécifiques réalisées sur un terrain en Greenset® (Bekraoui, Fargeas-Gluck, & Leger, 2012). Ils ont observé que les coups d'attaque mobilisent 6.5 % plus d'énergie que les coups de défense. Les revers sollicitent 7 % plus d'énergie à basse vitesse que les coups droits. Courir et frapper la balle demande 10% plus d'énergie que courir sans frapper la balle. Sur une population différente (10 joueurs de niveau national, participant à des tournois internationaux (ITF future)), Fernandez-Fernandez et al. (2010) ont trouvé à travers des situations d'entraînement à base de répétitions de frappes que le coût énergétique est supérieur pour les coups droits (18.5 kcal/min) comparés aux revers (16.8 kcal/min), lorsque les frappes sont jouées à plat. En revanche, il n'y a pas de différence significative sur des coups liftés. Ils ont

également montré que la surface de jeu n'influait pas les variables physiologiques mesurées ( $\dot{V}O_2$ , FC), comme d'autres auteurs l'avaient déjà suggéré (Morante & Brotherhood, 2006; Murias et al., 2007).

**Tableau 4.** Revue de Littérature de la consommation d'oxygène ( $\dot{V}O_{2max}$ ) évaluée au laboratoire et la consommation d'oxygène ( $\dot{V}O_2$ ) mesurée pendant le jeu en tennis. Adapté et complété de (Girard, 2006)

Référence	Niveau	Sexe (Nombre)	$\dot{V}O_{2max}$ mL.min <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup>	$\dot{V}O_2$ terrain mL.min <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup>	% $\dot{V}O_{2max}$	Surface
Baiget et al. (2016)	International	M (8)	60,6 (5,1) Spé	-	-	Dur
	National	M (30)	55,7 (5,4) Spé	-	-	Dur
Banzer et al. (2008)	International	M (1)	55,0 – 67,4	-	-	-
Baxter-Jones et al. (1993)	Régional j	F (81)	48,6 (5,3)	-	-	-
	Régional j	M (74)	57,6 (5,6)	-	-	-
Bergeron et al. (1991)	National	M (10)	58,5 (9,4)	-	-	Dur
Bernardi et al (1998)	Régional €	M (7)	67,0	30,0 (7,0)	46	TB
	Régional ¥	M (7)	62,0	32,0 (4,0)	51	TB
	Régional *	M (7)	66,0	39,0 (3,0)	59	TB
Buono et al. (1980)	Régional	M (11)	58,4 (4,2)	-	-	-
Buti al. (1984)	Régional j	M (8)	56,3 (6,5)	-	-	-
	Régional	F (8)	52,6 (8,2)	-	-	-
Christmass et al. (1995)	Régional	M (8)	54,3 (1,9)	-	73 (2)	Dur
Christmass et al. (1995)	National	M (8)	56,6 (1,0)	-	74 (5)	Dur
Copley (1980)	Professionnel		50,0	-	-	-
Dansou et al. (2001)	Régional	M (10)	58,5 (2,2)	32,6 (1,8)	56 (3)	-
Docherty (1982)	Professionnel	M	44,0	-	-	TB
Elliott et al. (1985)	Régional	M (8)	65,9 (6,3)	-	-	-
Fargeas-Gluck (2012)	Régional j	M (5) F (5)	54,9 (6,0) Spé	-	-	Dur
Fernandez et al. (2005)	International	M (6)	58,2 (2,2)	26,6 (3,3)	46 (7)	Dur
Ferrauti et al. (1998)	National	F (6)	41,1 (6,0)	23,1 (3,0)	59 (7)	-
		M (6)	47,5 (4,3)	24,2 (2,0)	54 (3)	TB
Ferrauti et al (2011)	National	M (14)	60,4 (5,3) Spé	-	-	TB + Moquette
		F (15)	47,3 (4,6) Spé	-	-	TB + Moquette
	National J	M (39)	56,4 (5,1) Spé	-	-	TB + Moquette
		F (31)	49,7 (5,1) Spé	-	-	TB + Moquette
Fitzgerald et al. (2003)	National	M (8)	70,9 (6,1)	-	-	Dur
	National	F (6)	59,7 (7,5)	-	-	-
Fraisse et al. (1991)	National j	M (44)	64,4 (4,7)	-	-	-
Fraisse et al. (1991)	National j	F (26)	55,8 (4,3)	-	-	-
Friedman et al. (1984)	Non précisé	M (13)	43,8 (4,3)	-	-	-
Girard et Millet (2004)	Régional j	M (7)	50,3 (3,9)	40,3 (5,7)	80 (11)	TB
				37,9 (7,5)	72 (15)	Dur
Girard et al. (2006)	National j	M (9)	63,8 (3,0) Spé	-	-	Dur
	National j	M (9)	58,9 -5,3)	-	-	Dur
Jousselin et al. (2006)	International	M (16)	63,1 (4,7)	-	-	-
Kraemer et al. (2003)	Régional	F (30)	49,4 (4,4)	-	-	-
Mero et al. (1989)	Régional j	M (9)	51,2 (7,5)	-	-	-
Morgans et al. (1987)	Régional	M (17)	46,4 (6,2)	-	-	-
Paruit-Portes (1982)	National	M (7)	69,6 (9,1)	-	-	-
		F (5)	60,5 (6,1)	-	-	-
Perry et al. (2004)	Régional	M (23)	56,0 (5,7)	-	-	-
	-	F (10)	45,6 (4,7)	-	-	-
Plawewski et al. (1990)	Regional	M (13)	60,0 (3,1)	-	-	-
		F (13)	50,0 (2,1)	-	-	-
Power et Walkers (1982)	Regional	F (10)	48,0 (2,1)	-	-	-
Powers et Walkers (1982)	Régional j	F (10)	48,0 (2,0)	-	-	-
Reilly et Palmer (1994)	Regional	M (8)	53,2 (4,8)	-	-	Dur
Schneider et al. (2001)	National	F (2)	48,6 (4,8)	27,0	56	-
Seliger et al. (1973)	National	M (16)	-	27,3 (5,5)	50	-
Smekal et al. (1995)	National	M (13)	58,8 (4,5)	-	-	-
Smekal et al. (2001)	National	M (20)	57,3 (5,1)	29,1 (5,6)	51 (6)	TB
Vodak et al. (1980)	Régional	F (25)	44,2 (5,1)	-	-	-
		M (25)	50,2 (5,7)	-	-	-

$\dot{V}O_{2max}$ , consommation maximale d'oxygène ;  $\dot{V}O_2$ , consommation d'oxygène moyenne pendant les matchs ; %  $\dot{V}O_{2max}$ , intensité relative moyenne pendant les matchs ; TB, terre battue ; -, variable non étudiée ; M, Masculin ; F, Féminin ; j, sujets jeunes ; €, serveur-volleyeur ; ¥, attaquant de fond de court ; \*, défenseur de fond de court ; Spé, test d'effort spécifique tennis.

### 1.2.5.3 Lactatémie

En tennis, la lactatémie est fréquemment utilisée pour estimer les intensités d'exercice lors d'un match afin de fournir des informations relatives à la production d'énergie issue de la glycolyse (Krustrup et al., 2006). [La] augmente significativement par rapport aux valeurs de repos ( $1-2 \text{ mmol.L}^{-1}$ ) mais reste généralement inférieure à  $3-4 \text{ mmol.L}^{-1}$  avec des valeurs fluctuant selon les joueurs (cf. tableau 3). Cependant, lorsque les points se prolongent ou deviennent très rapides, la lactatémie est susceptible d'atteindre des niveaux ponctuels supérieurs à  $4 \text{ mmol.L}^{-1}$  (e.g.  $\approx 6 \text{ mmol.L}^{-1}$ , (Christmass, Richmond, Cable, Arthur, & Hartmann, 1998),  $> 8 \text{ mmol.L}^{-1}$  (Mendez-Villanueva et al., 2007)), suggérant dans ces cas particuliers une contribution importante de la voie anaérobie lactique. Christmass et al (1998) ont rapporté une augmentation significative de [La] par rapport aux valeurs précédant l'exercice ( $2.1 \pm 0.3 \text{ mmol.L}^{-1}$ ) à partir du quatrième changement de côté lors d'un match de 90 min ( $5.0 \pm 1.0 \text{ mmol.L}^{-1}$ ); la valeur pic était atteinte lors du sixième changement de côté ( $5.9 \pm 1.3 \text{ mmol.L}^{-1}$ ) puis les valeurs relevées lors des changements de côté suivants restaient relativement stables. On a observé une corrélation entre l'élévation de la lactatémie et le nombre de coups frappés (Smekal, Baron, Pokan, Dirninger, & Bachl, 1995). Des niveaux élevés de [La] lors des points éprouvants en fin de match seraient susceptibles de déterminer le sort de la partie. En effet, une concentration de lactate supérieure à  $7-8 \text{ mmol.L}^{-1}$  a été associée à une diminution de la performance technique et tactique en tennis (McCarthy-Davey, 2000).

### 1.2.5.4 Difficulté de l'effort perçue (RPE)

La difficulté de l'effort perçue (RPE) est une mesure subjective de la perception de la pénibilité de la tâche (Robertson & Noble, 1997) et validée pour le tennis (Mendez-Villanueva, Fernandez-Fernandez, Bishop, & Fernandez-Garcia, 2010). Selon l'application de l'échelle de 6 à 20, il n'y a pas de différence de difficulté perçue selon que des joueuses de niveau international soient dans un jeu de service ou de retour ( $12.2 \pm 2.4$  vs.  $12.0 \pm 2.3$ ,  $P = 0.78$ ) (Fernandez-Fernandez, Sanz-Rivas, Fernandez-Garcia, & Mendez-Villanueva, 2008). D'un autre côté, avec des joueurs professionnels, il a été montré que les RPE sont supérieurs sur les jeux de service que sur les jeux de retour (Mendez-Villanueva et al., 2007). Cette même étude

montre des corrélations entre les RPE de 6 à 20 et le nombre de coups joués par point, ainsi qu'avec la durée des points joués. Plus largement, peu de données ont été rapportées concernant l'évolution de la RPE dans les sports de raquette. Par ailleurs, les études réalisées à ce jour n'ont pas toujours utilisées les mêmes échelles pour évaluer la RPE ce qui rend difficile la comparaison des résultats (cf. tableau 3).

### **1.2.6 Vitesse de Balle**

Les vitesses de balle ont été enregistrées avec un pistolet radar (Stalker Professional Sports Radar, Plymouth, MN, USA) (Fernandez-Fernandez, Kinner, & Ferrauti, 2010). En cherchant une balle liftée, la moyenne des vitesses était de 86 km h<sup>1</sup>, alors qu'en frappant à plat avec de l'engagement total la moyenne culmine à 120 km.h<sup>1</sup>. Le coup droit est significativement plus rapide que le revers (122 vs 111 km.h<sup>1</sup> sur TB, et 120 vs 112 km.h<sup>1</sup> sur moquette). Lors de situations sollicitant exclusivement le coup droit, Reid et al. ont relevé des moyennes de vitesses de balle allant de 113 à 125 km.h<sup>1</sup> (Reid, Duffield, Dawson, Baker, & Crespo, 2008). En utilisant le même outil de mesure de la vitesse de balle, des valeurs de 120 ± 2 km.h<sup>1</sup> ont été enregistrées pour des joueurs de niveau international (n = 7) en situation neutre (5 balles au centre), et 105 ± 2 km.h<sup>1</sup> en situation défensive (Vergauwen, Spaepen, Lefevre, & Hespel, 1998). Le « stalker ATS radar gun » (Applied Concepts, Texas, USA) a été utilisé pour évaluer les vitesses de balle en CD, produite lors de quatre situations d'entraînement sur des temps d'effort de 30 et 60 s (Reid et al., 2008). Cette étude concernait six joueurs de haut niveau australien âgés de 22 ans (± 6). Les vitesses s'échelonnaient en moyenne de 113.6 ± 13.7 km.h<sup>1</sup> à 123.5 ± 10.8 km.h<sup>1</sup>. La comparaison de six joueurs élite (âge 23 ± 2.3 ans; classement ATP : 347 ± 238) avec sept joueurs élite junior (âge : 16.3 ± 0.5 classement national top 15 dans sa catégorie) montre, à travers une situation fermée, que la vitesse de balle semble être le facteur déterminant de la différence de niveau de performance (Landlinger, Stöggl, Lindinger, Wagner, & Müller, 2012). La précision n'est pas affectée par la vitesse de balle dans cette étude. En revanche, les joueurs « ATP » ont des vitesses de balle supérieures en coup droit (124.5 ± 8.3 vs 114.1 ± 7.2 km.h<sup>1</sup>) et en revers (120.0 ± 7.7 vs 109.1 ± 5.4 km.h<sup>1</sup>) (Landlinger et al., 2012). Plus récemment les vitesses de balle ont été estimées lors des éditions de 2012 à 2014

de l'Open d'Australie (cf. tableau 4) (Reid et al., 2016). Cette étude a été réalisée avec la technologie Hawk-Eye.

**Tableau 5.** Caractéristiques des vitesses du service et des coups de fond de court lors de l'Open d'Australie (d'après Reid et al, 2016).

	Homme	Femme	P	ES
	Moy ± SD	Moy ± SD		
Service le plus rapide (km.h <sup>-1</sup> )	206.3 ± 11.8	171.8 ± 10.5	< 0.001	3.07
Moyenne des 1 <sup>ers</sup> services (km.h <sup>-1</sup> )	184.3 ± 9.3	155.5 ± 9.8	< 0.001	3.02
Moyenne des 2 <sup>nds</sup> services (km.h <sup>-1</sup> )	152.1 ± 9.6	131.2 ± 8.5	< 0.001	2.29
Moyenne des coups de FDC (km.h <sup>-1</sup> )	111.3 ± 5.5	106.1 ± 5.8	< 0.001	0.92

Moy: Moyenne ; SD : Ecart-type ; m : mètre ; P : indice de significativité statistique ; ES : Effect Size ; FDC : fond de court (coup droit et revers).

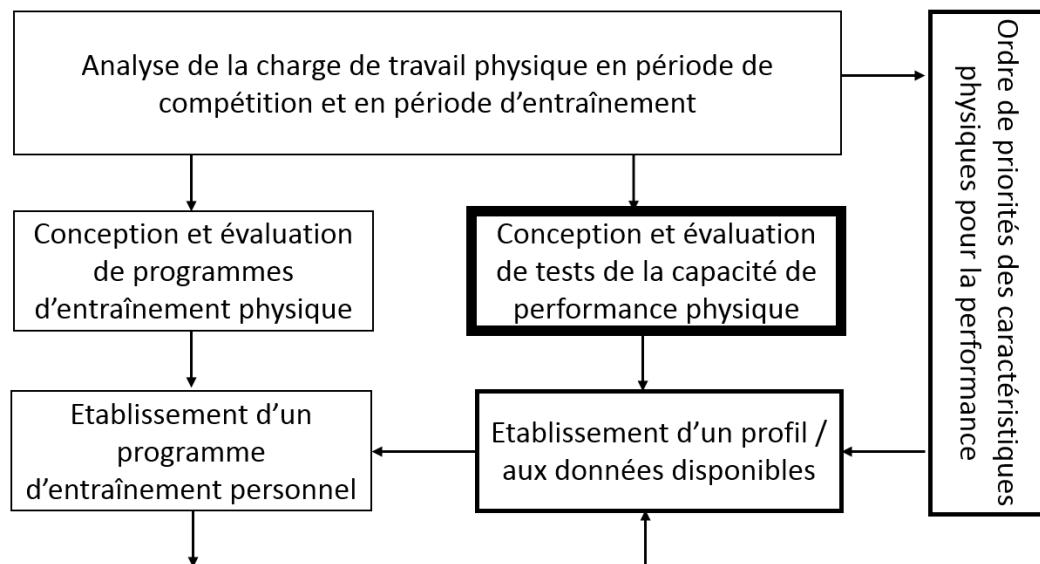
### 1.2.7 Surface et influence sur le jeu

L'impact de la surface de jeu sur l'impact physique en match a été documenté, avec des échanges plus longs et plus de frappes par échanges sur court lent (terre battue) que sur surfaces rapides (GreenSet®, par ex) (Morante & Brotherhood, 2006; Murias et al., 2007; O' Donoghue & Ingram, 2001). L'analyse des durées de points comparées selon le type de surface sont de plus en plus minces ces dernières années (Brown & O'Donoghue, 2008; Fernandez-Fernandez et al., 2007; Fernandez-Fernandez et al., 2008). Une augmentation des durées de points joués chez les hommes, lors des 4 grands chelems, a été montrée, pendant que cela diminuait chez femmes sur tous les tournois excepté Wimbledon (Brown & O'Donoghue, 2008). Sur des niveaux de jeu de haut niveau, mais inférieurs, Fernandez-Fernandez et al. ont trouvé des durées d'échanges légèrement plus long sur terrain rapide ( $8.2 \pm 5.2$  s) que sur terre-battue ( $7.2 \pm 5.2$  s) (Fernandez-Fernandez et al., 2008). Dans ces deux études, les joueurs avaient plutôt un style de jeu défensif au regard de la surface. Cela suggère que d'autres facteurs tels que les choix tactiques (Smekal et al., 2001), ou le type de balles utilisées (ITF, 2007), pourraient impacter la filière de jeu (durée des échanges) indépendamment de la surface du court. Par conséquent, des précautions méthodologiques doivent être prises lorsqu'on compare les études.

## 1.3 Les tests d'effort

### 1.3.1 Les recommandations scientifiques et médicales pour la définition d'un test d'effort avec incrémentation.

Il est courant d'utiliser les variables physiologiques recueillies à intensité maximale et sous maximale, pour prédire des capacités d'endurance et construire un programme d'entraînement (Bentley, Newell, & Bishop, 2007).



**Figure 4.** Représentation schématique du modèle d'optimisation de l'entraînement adapté aux spécificités de la discipline sportive. Adapté d'après (Fernandez-Fernandez, Ulbricht, & Ferrauti, 2014)

La question du protocole optimal (incrémentations, durée, ergomètre) se pose régulièrement, et la validité ainsi que la reproductibilité des valeurs mesurées, sur des paliers allant de 1 à 5 minutes, a peu été explorées sur une population de sportifs entraînés (Bentley et al., 2007). Dans leur revue de littérature, ils concluent en faveur des paliers de 3 minutes pour déterminer les seuils ventilatoires, ainsi que les seuils lactiques. Cependant certains auteurs n'ont pas trouvé de différences significatives sur ergocycle, en comparant des paliers d'1 minute avec des paliers de 3 minutes (Amann, Subudhi, & Foster, 2004; Weston, Gray, Schneider, & Gass, 2002). De plus, la puissance maximale mesurée lors d'un protocole court (palier d'1 minute) s'avère très fiable sur ergocycle (coefficient de variation = 2%) (Balmer, Davison, & Bird, 2000). Malgré la popularité des protocoles longs ( $\geq 3$  minutes) pour évaluer des cyclistes entraînés (Bentley, Wilson, Davie, & Zhou, 1998; Bishop, Jenkins, & Mackinnon, 1998; Padilla, Mujika, Orbananos, & Angulo, 2000), d'autres résultats orientent pour une préférence envers les paliers



d'une minute pour déterminer la PMA et les seuils ventilatoires (Lucia, Pardo, Durantez, Hoyos, & Chicharro, 1998). La PMA est significativement supérieure sur ergocycle avec les paliers d'une minute, en comparaison avec des paliers de 3 et 5 minutes (Bentley & McNaughton, 2003; Bishop, Jenkins, McEniery, & Carey, 2000; McNaughton, Roberts, & Bentley, 2006). Par ailleurs, il n'y a pas de différence significative sur la mesure de  $\dot{V}O_{2max}$  entre des paliers de 1, 3 ou 4 minutes, sur rameur (Pierce, Hahn, Davie, & Lawton, 1999).

Il est suggéré de limiter la durée du test dans le temps. En effet, il préconise des tests d'une durée de 8 à 12 min pour obtenir une valeur de  $\dot{V}O_{2max}$  fiable (Buchfuhrer et al., 1983). Plus récemment, cette idée a été modérée en élargissant la fourchette entre 5 et 26 minutes au regard des tests validés sur tapis roulant, et entre 7 et 26 minutes sur ergocycle (Midgley, Bentley, Luttikholt, McNaughton, & Millet, 2008).

La Société Française de Médecine du Sport a élaboré les recommandations suivantes (Vallier et al., 2000)

- La durée du test doit être comprise entre 7 et 20 minutes.
- Le premier palier ne doit pas être trop brutal afin de ne pas trop solliciter les processus anaérobies.
- Il faut respecter un minimum de 48h entre deux tests maximaux, et ne pas avoir effectué de charge importante de travail dans les 48h précédant la réalisation de l'épreuve.

### **1.3.2 Détermination de l'atteinte d'une PMA**

L'American College of Sports Medicine recommande quatre critères pour déterminer la PMA : un plateau de  $\dot{V}O_2$  défini comme une augmentation de moins de  $1,5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  malgré une augmentation progressive de l'intensité d'exercice, un Quotient Respiratoire de 1,1 et au-dessus, une FC autour de 95% de la  $FC_{max}$  relative à l'âge, [La] supérieure à  $8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  (ACM'S, 2006). Le plateau de  $\dot{V}O_2$  proposé par Taylor et al. (Taylor, Buskirk, & Henschel, 1955) a été discuté ces dix dernières années. Il a été critiqué à cause d'un manque de bases théoriques et statistiques (Astorino, Robergs, Ghiasvand, Marks, & Burns, 2000). En revanche, bon nombre d'études montrent que la phase de vérification ne modifie pas les valeurs de  $\dot{V}O_{2max}$  (Schaun, 2017) identifiées initialement avec la technique de Taylor et al (Taylor et al., 1955).

### **1.3.3 La phase de vérification pour confirmer la $\dot{V}O_{2max}$**

Considérer  $\dot{V}O_{2peak}$  comme la  $\dot{V}O_{2max}$  peut représenter une erreur ou une limite méthodologique dans la mesure où l'intensité maximale à laquelle des personnes peuvent stopper leur effort sans cesser d'être allées au bout de leur capacité, par manque de motivation ou pour cause de fatigue (Poole & Jones, 2017).  $\dot{V}O_{2peak}$  correspond à la valeur la plus haute de  $\dot{V}O_2$  atteinte lors d'un test d'effort (Poole, Wilkerson, & Jones, 2008). Par conséquent, il est clair qu'une phase de vérification est souhaitable pour déterminer avec fiabilité une mesure de  $\dot{V}O_{2max}$ . A ce jour, les modalités de vérification restent variées, sans consensus ciblés en fonction des populations (Jeunes, âgés, sportifs de haut niveau, etc...) (Schaun, 2017). Cette démarche de vérification ne semble pas particulièrement destinée aux sportifs de haut niveau, mais plutôt aux sujets ayant une faible connaissance de leur capacité et une motivation limitée

### **1.3.4 Les Tests de terrain**

#### **1.3.4.1 Tests généraux (non spécifiques)**

Plusieurs tests généraux progressifs d'estimation de la capacité maximale aérobie ont été proposés au début des années 80 (Brue, 1985; L. Leger & Boucher, 1980). Cependant, le test navette d'évaluation de la vitesse maximale aérobie (VMA) (L. A. Leger & Lambert, 1982) est celui qui est le plus utilisé aujourd'hui, car il constitue le test d'effort pour le suivi fédéral des jeunes joueurs de tennis français. La facilité de la mise en place de ce test et la possibilité de faire passer de nombreux sujets lors d'une même session de test expliquent sa large application. Il s'agit d'une épreuve individuelle ou collective qui détermine la VMA définie comme la vitesse théoriquement minimale sollicitant la consommation maximale d'oxygène. Cette épreuve estime de manière indirecte la  $\dot{V}O_{2max}$ . Les sujets effectuent des courses navette entre deux plots espacés de 20 m, sous la forme d'allers-retours, et de suivre la vitesse indiquée par un signal sonore. A chaque indication sonore, le sujet doit se trouver au niveau de l'un des plots. La vitesse de course initiale est de 8,5 km.h<sup>-1</sup> puis est progressivement incrémentée de 0.5 km.h<sup>-1</sup> toutes les minutes. L'épreuve prend fin avec l'épuisement du sujet. La vitesse du dernier palier de course complètement terminé permet de déterminer la VMA de l'athlète et d'estimer sa  $\dot{V}O_{2max}$ .

**Limites-** les distances de 20 m et les déplacements unidirectionnels de ce test ne sont pas caractéristiques des courses effectuées sur le court.

A partir de ces considérations, plusieurs tests de terrain (plus ou moins) spécifiques au tennis ont été développés en vue d'évaluer la capacité de performance physique et technique dans un contexte adapté.

#### **1.3.4.2 Tests semi-spécifiques**

Cependant, en considérant le pattern d'activité intermittent au tennis, la pertinence de ces tests continus a été questionnée, conduisant au développement de procédures de tests comme les procédures « Yo-Yo Intermittent Recovery » (Bangsbo, Iaia, & Krstrup, 2008) et « 30-15 Intermittent Fitness Test » (Buchheit, 2008) présentant un haut degré de validité et une excellente reproductibilité. Brièvement, les tests Yo-Yo consistent à répéter des courses navettes ( $2 \times 20$  m) à une vitesse progressivement accélérée, alternés avec des périodes de récupération active ( $2 \times 5$  m jogging) de 10 s. Le niveau 1 démarre à une vitesse plus lente que le niveau 2 (vitesse initiale de 10 et 13  $\text{km.h}^{-1}$ , respectivement) et l'incrément de charge est aussi plus modéré. Le test « Yo-Yo-IR1 » évalue l'habilité à réitérer des efforts de façon intermittente avec une contribution aérobie plus marquée que le test « Yo-Yo-IR2 » qui sollicite fortement aussi bien les systèmes aérobies et anaérobies de production d'énergie. Le « 30-15 Intermittent Fitness Test » est constitué de périodes de course de 30 s, entrecoupées de périodes de récupération marchées de 15 s. Durant les périodes d'effort, il s'agit de courir en allers-retours, sur une distance de 40 m, à une vitesse progressivement incrémentée ( $0,5 \text{ km.h}^{-1}$ ) à chaque course par une bande sonore. Ceux-ci demeurent trop peu spécifiques et ne respectent pas précisément les caractéristiques du jeu (distances de courses trop importantes, pas de prise d'information visuelle, changements de direction de type 'volte-face', course sans raquette). Aussi, des procédures de tests spécifiques au tennis ont été développées pour répondre à ces exigences.

### 1.3.4.3 Tests Spécifiques (physiques et techniques)

- **Le Leuven Tennis Performance Test (Vergauwen et al., 1998)**

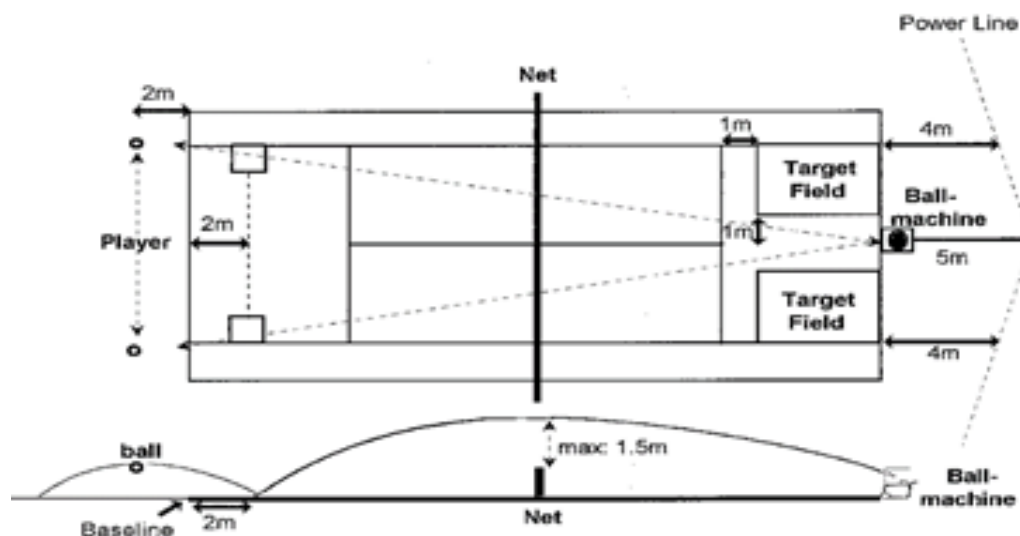
Un problème central de la recherche appliquée en tennis est le faible nombre de procédures visant à évaluer de manière fiable les déterminants de la qualité de la frappe dans les sports de raquette. Le *Leuven tennis performance test* développé par Vergauwen et al. (1998) est une procédure expérimentale réalisée sur le court. Elle a pour objectif de mesurer la qualité du jeu à partir d'indicateurs tels que le pourcentage d'erreur, la vitesse et la précision des coups, lors de situations tactiques simulant la compétition chez 27 joueurs de niveau national à international. D'un point de vue pratique, ce test consistait en la réalisation de 350 coups représentant cinq jeux de dix points. Chaque jeu consistait en l'exécution de trois points neutres, quatre points défensifs et trois points offensifs. Chaque point débutait par un service (1<sup>ère</sup> ou 2<sup>ème</sup> balle) et cinq balles étaient projetées par une machine lance-balles. Deux diodes lumineuses s'allumaient alternativement afin d'indiquer au joueur les cibles à atteindre. Pendant la procédure, les sujets observaient 20 s de récupération entre les points et 90 s entre les jeux. La variation des directions et de l'intervalle de temps entre les projections produisait des points à caractère plus ou moins offensif. Ce test a été utilisé pour étudier les effets du niveau de pratique et de la fatigue sur la qualité de la frappe dans un contexte approprié au jeu. Les principaux résultats ont montré que les joueurs de niveau international produisaient des coups plus puissants (vitesse de balle plus élevée) et plus précis (placement des balles par rapport aux lignes, moins d'erreurs) que les joueurs nationaux. La qualité des coups de fond de court et de la seconde balle de service diminuait au cours d'un match standardisé de 2 h. Cependant les résultats de cette étude restent essentiellement descriptifs, puisqu'aucune hypothèse n'est formulée pour expliquer les différences constatées entre les deux groupes ou en situation de fatigue. Quoiqu'il en soit, cette procédure de test a également montré sa validité pour évaluer la qualité du jeu dans différentes situations simulant la compétition. Egalement, un test visant à évaluer spécifiquement l'efficacité du coup droit chez des jeunes tennismen a récemment été présenté (Vergauwen, Madou, & Behets, 2004).

**Limites :** Ces tests rendent possible l'obtention d'informations pertinentes et reproductibles sur la qualité de la frappe du joueur de tennis lors de différentes situations de jeu répliquant la compétition. Cependant, ils ne permettent pas d'évaluer les capacités physiques. De plus, l'utilisation de ce test apparaît limitée à un nombre restreint de joueurs (élites), dans la mesure où sa réalisation requiert une machine lance-balles, un système de programmation de diodes lumineuses, un radar ou encore une caméra vidéo.

▪ **Le « On-Court » Endurance Testing in Tennis (Smekal et al., 2000)**

L'objectif de ce test est de comparer les réponses métaboliques et physiologiques de 12 joueurs de tennis (niveau national et régional) ayant participé à deux tests incrémentaux : un test de terrain incluant des éléments de jeu (frappe de balle, déplacements spécifiques) et un test de laboratoire réalisé sur tapis roulant. Le test de terrain consistait en la réalisation de 12 frappes de balle de fond de court par minute, projetées par une machine lance-balles. L'incrémentaire était de + 2 balles  $\text{min}^{-1}$ , toutes les 3 min, avec une récupération de 30 s pendant lesquelles une mesure de lactate était réalisée à partir de sang pris au niveau du lobe de l'oreille. Les joueurs devaient frapper alternativement des coups droits et des revers croisés. Les enregistrements de  $\dot{V}O_2$  pendant le test en laboratoire étaient utilisés afin d'établir la charge initiale lors du test de terrain. Une analyse de la précision des coups a également été réalisée. Les principaux résultats de cette étude montrent des différences concernant les valeurs maximales des variables physiologiques ( $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}E$ ,  $V_T$  et  $[La^-]$ ) étaient inférieures lors du test spécifique, suggérant une complémentarité des deux types de test. Les auteurs proposent une explication autour d'adaptations liées à l'entraînement dans le geste spécifique. Également, l'intensité du test de terrain (évaluée par le nombre de coups frappés par minute) était fortement corrélée ( $r = 0.94$ ) à l'ordre de classement des joueurs, suggérant que ce test est valide pour évaluer le niveau de performance. A contrario, aucune corrélation n'a pu être trouvée entre le classement et les variables physiologiques mesurées. Selon les auteurs, l'indice de précision dans les conditions de jeu qu'ils ont aménagé seraient particulièrement intéressants pour les joueurs juniors, et moins adaptés aux joueurs de haut niveau. Malgré tout, nous trouvons très intéressant le choix de la zone-cible matérialisée à partir de 1 m derrière la ligne de carré de service, située entre la ligne

de simple et une droite perpendiculaire à la ligne de fond de court qui part à 1m du milieu du court. (cf. [figure 5](#) ci-après).



**Figure 5.** Schéma du « On-Court » Endurance Testing in Tennis.(Smekal et al., 2000)

**Limites** - La corrélation entre le niveau de précision et le classement s'explique probablement par le style de jeu des participants à l'étude. En effet, les auteurs ont précisé qu'il s'agissait très majoritairement de joueurs de fond de court ayant une nette préférence pour la terre battue et le jeu défensif. Même si la reproductibilité du test a été démontrée à partir de 8 joueurs sur des mesures physiologiques et de précision, entre deux réalisations de test à 4 jours d'intervalle, nous émettons des doutes sur la fiabilité de la machine, en termes de précision et de vitesse de balle produite. En effet, nous pouvons nous interroger sur l'outil pour lequel nous n'avons pas d'informations précises. D'autre part, les paliers de 3 minutes limitent inévitablement l'engagement dans la frappe, et pourraient très bien expliquer les plus faibles valeurs physiologiques mesurées pendant le test de terrain.

- **Loughborough Intermittent tennis test (Davey, Thorpe, & Williams, 2002)**

Le but de l'étude présentée par Davey et al. (2002) était d'examiner les effets de la fatigue sur la performance en tennis évaluée par la précision des coups. Ainsi, les sujets ont réalisé deux types de tests 1) des sessions pré- et post-tests incluant des services et des coups de fond de court et 2) un test fatiguant qui consistait en la réalisation de périodes de tennis de 4 min entrecoupées de 40 s de récupération jusqu'à l'épuisement du sujet. Une machine lance-balle

était utilisée afin d'envoyer aléatoirement des balles à une cadence de 30 balles min<sup>-1</sup>. Les résultats principaux de cette étude ont mis en évidence qu'après la réalisation du Loughborough Intermittent test (≈ 35 min) la précision des coups de fond de court et du service était respectivement diminuée de 69% et 30%.

**Limites** - Ce test apparaît intéressant à intégrer dans la programmation d'entraînement du joueur de tennis afin d'évaluer son comportement en situation de fatigue. Mais le type de fatigue induit ne reflète pas précisément les patrons de l'activité (durées d'exercice et de récupération) observés lors des matchs de tennis.

Les zones de précision étant relativement difficiles à atteindre (pour les coups de fond de court, elle est située dans les deux angles de fond de court, et ne mesure que 1.5 m<sup>2</sup>), les niveaux de précision étaient faibles dans les 2 tests (avant et après l'exercice fatiguant). En effet, on compare des niveaux de précision à peine autour de 10% sur les coups de fond de court, et autour de 20% sur les services.

- **Specific incremental field for aerobic fitness in tennis (Girard, Chevalier, Leveque, Micallef, & Millet, 2006)**

Le but de l'étude était 1) de développer un test d'effort progressif incluant certains éléments de la pratique du tennis (FT); et 2) de comparer les réponses physiologiques (FC et [La]), la perception subjective de l'effort (RPE), à effort maximal et aux 2 seuils ventilatoires, enregistrées durant ce test sur le terrain à celles observées lors d'un test progressif sur tapis roulant, avec neuf joueurs de tennis bien entraînés (âge moyen : 16.0 ± 1.6 ans, fréquence d'entraînement moyenne 8.2 ± 3.1 h.sem<sup>-1</sup>).

Le test sur tapis (TT) roulant consistait en une charge de travail continue de 9 km.h<sup>-1</sup> d'une durée initiale de 3 minutes, suivie d'une augmentation de 0.5 km.h<sup>-1</sup> toutes les minutes (pente 0%). Chaque phase se composait d'une période de course de 45 s suivie de 15 s de récupération active pendant lesquelles les sujets devaient marcher à une vitesse de 5 km.h<sup>-1</sup>.

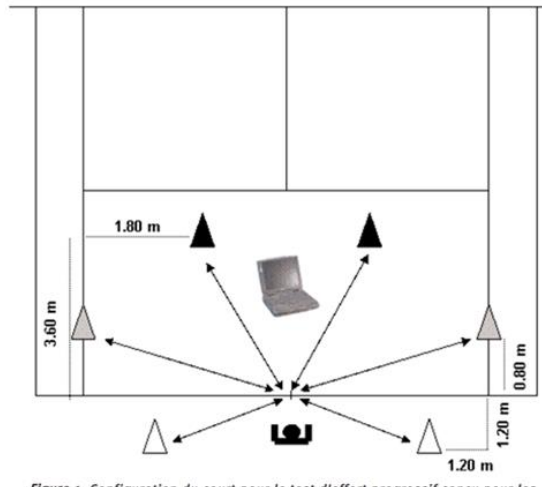
Le FT consistait à répéter des déplacements reproduisant ceux observés au tennis. Chaque phase comprenait sept allers-retours effectués à partir d'une position centrale en direction d'une des six cibles situées sur le court, suivies d'une période de récupération active de 15 s (cf. [figure 6](#)). Chaque série de 7 courses incluait deux courses vers l'avant (offensives), trois courses

latérales (neutres) et deux courses vers l'arrière (défensives) réalisées de manière aléatoire. Une fois arrivé à l'endroit de la cible, le sujet devait mimer une frappe puissante comme s'il était en match, puis reculer vers la ligne de fond après chaque coup. Les vitesses et directions des déplacements étaient contrôlés par des retours visuels et sonores à partir d'un ordinateur. Brièvement, un logiciel spécifique était utilisé afin d'émettre un son (bip) et de projeter simultanément une image d'un joueur se déplaçant autour de la cible à atteindre. Ces vitesses et séquences de déplacements s'étalaient sur 40.5 s à la première séquence, pour décroître progressivement de 0.8 s par palier. La fiabilité du test a été déterminée chez quatre sujets réalisant deux FT en l'espace d'une semaine.

Les TT et FT étaient réalisés jusqu'à l'épuisement des sujets. A cet instant, les valeurs de [La] et de RPE étaient déterminées à partir d'un analyseur portatif (lactate Pro, LT-1710, Arkray, Japon) et de l'échelle de Borg à 15 échelons, respectivement. Les valeurs les plus élevées enregistrées pour la FC au-dessus de 15 s d'effort (S810, Polar, kempele, Finlande) lors des tests FT et TT étaient considérées comme les valeurs de  $FC_{max}$ . La comparaison du FT et du TT montre qu'à intensité maximale, les valeurs physiologiques ( $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$  et QR) sont significativement supérieures avec le FT. Cela suggère que les les valeurs de  $\dot{V}O_{2max}$  issues d'un test de laboratoire n'estiment pas assez précisément la condition physique d'un joueur de tennis.

**Limites** - Ce test n'est pas spécifique dans la mesure où il n'y a pas de vraies frappes de balle. De plus, la majorité des courses se font vers l'avant, à l'intérieur du court, alors que l'analyse des matchs de haut niveau à travers 35 matchs de Roland Garros 2011 montre que 70.6% des déplacements des hommes s'effectuent derrière la ligne de fond de court, et 84.4% pour les femmes (Dupuy et al., 2012).





**Figure 6.** Configuration du court pour le test d'effort progressif conçu pour les joueurs de tennis. Indication de l'emplacement des cibles pour les déplacements vers l'avant (cônes noirs), les déplacements latéraux (cônes gris) et les déplacements vers l'arrière (cônes blancs).

- **The Hit & Turn Tennis test (Ferrauti, Kinner, & Fernandez-Fernandez, 2011)**

Le test Hit & Turn tennis est un test d'effort spécifique acoustique. 96 joueurs de tennis (53 hommes, 45 femmes) d'âges différents ont participé à la validation de ce test comparé avec le test de smekal et al. (2001), et un test de course sur tapis roulant. La vitesse de balle utilisée avec la machine lance-balles est fixée à 70 km.h<sup>-1</sup>.

Le test Hit & Turn comprend 20 paliers avec une diminution du temps entre les signaux sonores produits (0.1 s par palier) alternativement sur le coup droit et le revers, en commençant à 4.9 s pour réduire à 3.0 s (palier 20). Chaque niveau dure entre 47-50 s, soit 12-16 frappes simulées. Les formes de déplacements sont imposées en dissociant la première partie de la course en pas croisés suivis de pas chassés jusqu'au milieu du terrain, suivis d'une course en direction de l'angle du court opposé. Les déplacements sont réalisés le long de la ligne de fond de court en allant d'un angle du terrain de double à l'autre. Il y a 10 s de récupération entre chaque palier. Après les paliers 4, 8, 12, et 16, la pause dure 20 s afin de pouvoir prendre les lactates. L'analyseur de gaz utilisé est le Metamax II CPX (Cortex, Leipzig, Germany). Une meilleure corrélation entre la performance maximale ( $r = 0.81$ ,  $P < 0.01$ ) et la consommation maximale d'oxygène ( $r = 0.83$ ,  $P < 0.01$ ) a été observée entre le test Hit & Turn et le test de Smekal, en comparaison avec la corrélation entre le Hit & Turn et le test sur tapis.

Pour le test-retest, il a été trouvé une corrélation significative entre la performance maximale sur la même surface ( $r = 0.83$ ,  $P < 0.01$ ) et sur différentes surfaces ( $r = 0.74$ ,  $P < 0.01$ ).

**Limites** - La frappe simulée pose un problème dans la mesure où l'engagement ne peut pas être comparable à une vraie frappe. Cela pose le problème de la spécificité du test. De plus, le jeu de jambes s'adapte naturellement au rythme du jeu, et peut s'organiser sur de la course droite parallèle au filet lorsque le rythme l'impose. En l'occurrence, l'organisation de ce test ne le permet pas.

La distance parcourue entre chaque simulation de frappe ne paraît pas adéquate, trop longue au regard de l'analyse de l'activité. Il paraît possible d'obtenir une PMA avec moins de distance entre chaque frappe.

- **Le NAVTEN (in “Comparaison of two aerobic field tests in young tennis players” (Fargeas-Gluck & Leger, 2012)**

Cette étude compare la réponse maximal d'un nouveau test d'effort spécifique tennis, le NAVTEN, à un test très connu et très pratiqué, le test Navette (ou 20m SRT) (L. A. Leger & Lambert, 1982). La comparaison NAVTEN vs. 20m SRT est intéressante car ce-dernier est le test de terrain de référence depuis 1988 pour les joueurs de tennis. Le NAVTEN est un test intermittent (1min /1 min) avec déplacements latéraux et frappes de balle. Le joueur court en direction de la balle lancé par un entraîneur dans une zone cible matérialisé par un triangle de 1.0 x 1.5 x 1.5 m située à 1.5 m de la ligne de fond. L'entraîneur situé 1.5 m derrière le filet envoie les balles selon un rythme imposé par une bande sonore. Les balles sont envoyés selon la séquence suivante : CD, Rev, Rev, CD, CD, Rev, CD, CD, Rev, Rev. Il y a ainsi un équilibre entre le nombre de Rev et CD joués, et le nombre de courses sur moitié de terrain (2 x 5 m) comparable aux grandes courses (1 x 10m). Entre chaque balle le joueur doit revenir sur une position centrale située 1m derrière la ligne de fond. Les paliers sont exprimés en vitesse de course, à partir de la distance à parcourir et du temps entre chaque envoi de balle. La vitesse initiale est de 5 km h<sup>-1</sup> pour les enfants de moins de 12 ans, et de 6 km.h<sup>-1</sup> pour les enfants de plus de 6 ans, avec une incrémentation de 0.5 km.h<sup>-1</sup>. Par exemple, à 5 km.h<sup>-1</sup>, les balles sont envoyés toutes les 7.2 s. L'incrément choisi est d'une balle supplémentaire par palier. Le meilleur a atteint le palier 18 balles.min<sup>-1</sup>. 10 jeunes joueurs élite âgés de 12.9 ans ± 0.3 (moyenne ± SD) ont pratiqué les 2 tests avec un suivi de la FC et de la  $\dot{V}O_2$ . Le 20m SRT et le

NAV TEN montrent une FC<sub>pic</sub> ( $202 \pm 6.1$  vs  $208 \pm 9.5$  bpm) et une  $\dot{V}O_{2pic}$  ( $54.2 \pm 5.9$  vs  $54.9 \pm 6.0$  mL.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>) similaires. La corrélation de Pearson entre les deux tests était de 0.88 pour le  $\dot{V}O_{2pic}$  et de 0.92 pour la vitesse maximale. L'utilisation du NAV TEN est donc supportée par les résultats obtenus. Le fait que 2/3 des sujets aient obtenu des classements (de performance) différents dans les 2 tests suggère que le NAV TEN pourrait être plus spécifique que le test navette pour évaluer l'aptitude physique aérobie des joueurs de tennis. De plus, le NAV TEN est plus pédagogique pour des jeunes, même si les valeurs maximales sont très proches. Il est intéressant de constater que les vraies frappes de balles (à plat ou liftées) dans un protocole spécifique amènent le joueur à des FC<sub>pic</sub> et des  $\dot{V}O_{2pic}$  supérieures.

**Limites-** Considérer la vitesse de déplacement dans l'analyse à partir d'une supposition de distance parcourue de 10m entre chaque frappe n'apparaît pas très fiable car, une fois de plus, tout dépend de l'envoi de balle. Dans le cadre décrit, il s'agissait d'un entraîneur. La distance et la vitesse de déplacement dépendent de la balle envoyée (vitesse et effet). En effet, selon la qualité de la balle envoyée, au-delà de la précision, on pourra aller la jouer à l'intérieur du terrain ou devoir s'adapter en la jouant probablement derrière la ligne de fond de court. Les auteurs auraient pu en rester au temps total de maintien dans le test pour comparer les performances. La détermination de la vitesse maximale de course n'était probablement pas indispensable. Le choix d'1min de récupération entre les paliers n'a pas été discuté et justifié.

- **Le SET-Test (Specific Endurance Tennis- test) (Baiget, Fernandez-Fernandez, Iglesias, Vallejo, & Rodriguez, 2014)**

Cette version modifiée du test précédemment publié par Smekal et al. (2000) a été validée et publiée. Le protocole a été approuvé en étroite collaboration avec des entraîneurs de haut niveau (entraîneurs professionnels, certifié avec le plus haut niveau par la Fédération espagnole de tennis [RFET], et avec un minimum de 10 ans d'expérience). Sans pouvoir simuler la grande variété de situations de jeu lors d'un match de tennis, il comprend certains éléments standardisés du tennis. Il est pratiqué sur un court de tennis, et comprend une analyse de la précision des frappes. Le test de terrain original de Smekal et al. (2000) avec une fréquence de balles de 12 coups par minute au début, avant d'être augmentée de 2 coups par minute toutes les 3 minutes,

était également basé sur l'utilisation d'une machine lance-balles. Les modifications par rapport à ce test initial sont (a) l'inclusion de paliers plus courts (2 minutes au lieu de 3 minutes) et (b) le test commençant par une fréquence de balles de 9 balles.min<sup>-1</sup> au lieu de 12 balles.min<sup>-1</sup>, avec une incrémentation de 2 balles.min<sup>-1</sup> toutes les 2 minutes, en continu. Ces modifications ont été mises en place pour limiter la durée du test dans les limites favorisant une détermination fiable et cohérente des paramètres cardiorespiratoires ( $\dot{V}O_{2max}$  et les seuils ventilatoires), avec une durée de test comprise entre 8 et 20 minutes (Vergauwen et al., 2004). La vitesse de la balle produite par la machine était constante ( $68.6 \pm 1.9$  km.h<sup>-1</sup>). Les balles étaient alternativement projetées par une machine à balles (Pop-Lob Airmatic 104, Bagneux, France) à droite et à gauche de la ligne de fond de court. Les participants doivent frapper en alternance coups droits et revers croisés, ou long de ligne (effet lifté ou plat). Les coups slicés ne sont pas autorisés pour éviter qu'ils influencent le déplacement du joueur à la balle en nuisant à la réponse physiologique, et donc à la fiabilité du test.

Le test s'arrête lorsque le joueur ne suit plus le rythme ou fait chuter brutalement sa performance technique.

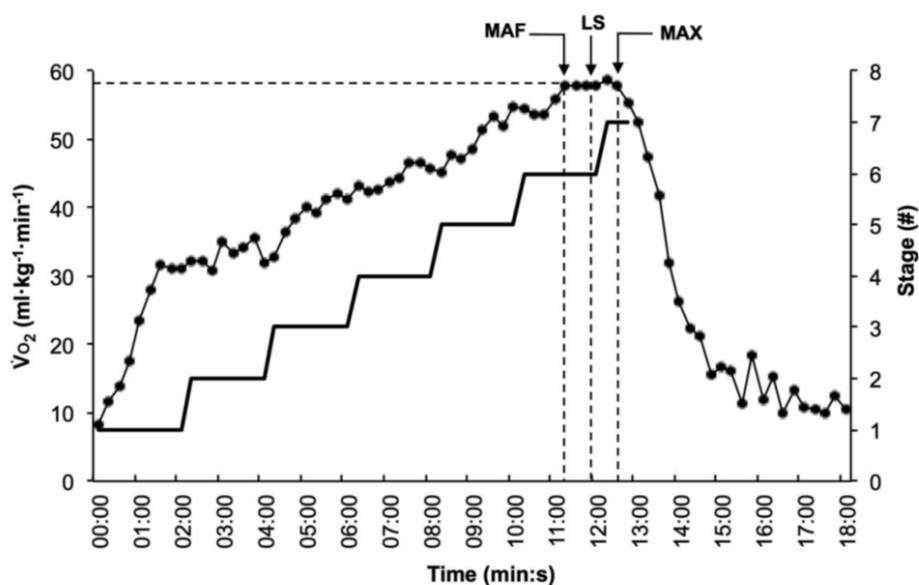
En plus des mesures physiologiques (échanges gazeux et FC), une évaluation objective du « TE » (Efficacité Technique) a été effectuée. L'efficacité technique a été calculée sur la base du pourcentage de coups réussis. Les critères de réussite ont été définis comme suit: (a) précision: la balle retournée par le joueur devait rebondir à l'intérieur de la cible (idem Smekal et al. (2000), cf. Figure 5) et (b) puissance: une fois que la balle a rebondi à l'intérieur de la zone cible, elle doit passer par-dessus la ligne électrique (située à 5 m du centre de la ligne de fond de court et à 4 m de la ligne latérale), avant de rebondir pour la deuxième fois (cf. Figure 5).

La machine à balles est étalonnée manuellement avant chaque test. Un minimum de 40 nouvelles balles de tennis (Babolat Team Spain) ont été utilisées pour chaque test.

A partir de ce test, la notion de **fréquence maximale aérobie** de balles frappées (« Maximal Aerobic Frequency of ball hitting ») a été mise en avant et publiée (Baiget, Iglesias, &

Rodriguez, 2017). Cette valeur est déterminée pour la fréquence de balles à laquelle apparaît la

$\dot{V}O_{2max}$ .



**Figure 7.** Exemple chez un sujet de la consommation d'Oxygène (ligne de points) et évolution par paliers (« stage ») pendant SET-test. Les paramètres indiqués sont la fréquence maximale aérobie de balles frappées (MAF), c'est à dire, la plus faible intensité à laquelle apparaît pendant 15 secondes une moyenne de  $\dot{V}O_2$  équivalente à  $\dot{V}O_{2max}$ ; dernier palier (LS: (« last stage »)), c'est à dire l'intensité soutenue pendant au moins 1 minute à la fin du test; et le palier maximal atteint (MAX), c'est à dire, l'intensité à l'arrêt de l'exercice. (Baiget et al., 2017).

**Limites-** Ce test contient 2 inconvénients majeurs a) sans récupération entre les paliers de 2 minutes, on peut s'attendre à une saturation de l'avant-bras causée par la longueur du temps de jeu continu (min.s) ( $13.38 \pm 01.36$  [13.05 - 14.13]). Dans ces conditions se pose la question de la perte de performance technique qui est mesurée. Est-elle dûe à une difficulté de l'exercice ou à une ischémie localisée au niveau de l'avant-bras ? Avec une valeur de  $\dot{V}O_{2max}$  au plus haut à  $57.5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  avec 7 joueurs classés entre la 600<sup>ème</sup> et la 1000<sup>ème</sup> place ATP (et un panel de 35 sujets), on est en mesure de se questionner sur la fiabilité de ce test pour amener les joueurs à  $\dot{V}O_{2max}$ . Les valeurs de MAF ( $18.1 \pm 1.5$  [17.6 – 18.6] balles. $\text{min}^{-1}$ ) sont très basses, probablement pour les mêmes raisons que celles développées ci-dessus. Elle diffère peu du dernier palier atteint ( $20.2 \pm 1.7$  [19.7 – 20.8]). Cela pose un problème de cohérence entre une démarche qui paraît scientifiquement recevable et des données complètement inexploitable pour l'entraînement de joueurs de haut niveau, voire de niveau confirmé en club. Les valeurs de MAF pour construire des séances d'entraînement, correspondent à une intensité inférieure à ce que nous utilisons au 1<sup>er</sup> seuil ventilatoire avec des joueurs(ses) de haut niveau ( Brechbuhl,

Girard, Millet, & Schmitt, 2016; Brechbuhl, Girard, Millet, & Schmitt, 2016; Brechbuhl, Girard, Millet, & Schmitt, 2017; Brechbuhl, Girard, Millet, & Schmitt, 2017).

Nous faisons le même constat limitant que pour les tests précédents au niveau de la technologie utilisée de laquelle dépend la précision du test. Nous préférons notre technologie hightof® et ses garanties de précision désormais publiées et disponibles (Brechbuhl, Millet, & Schmitt, 2016). Leurs vitesses de balle produites par leur machine, en admettant qu'elle soit constante, paraît trop lente ( $68.6 \text{ km.h}^{-1} \pm 1.9 \text{ km.h}^{-1}$ ).

La création d'un test d'effort fiable qui intègre des paramètres techniques et physiologiques permet de mieux estimer le niveau d'aptitude à une performance à venir. Il apparaît également intéressant d'évaluer les effets d'un entraînement (e.g., RSH) à travers l'analyse de paramètres intégrés dans une séquence unique qui n'excède pas 25 min. La littérature scientifique a déjà montré des effets susceptibles d'améliorer les performances physiques des joueurs de tennis.

#### 1.4 La répétition de sprint en hypoxie, un élément de réponse

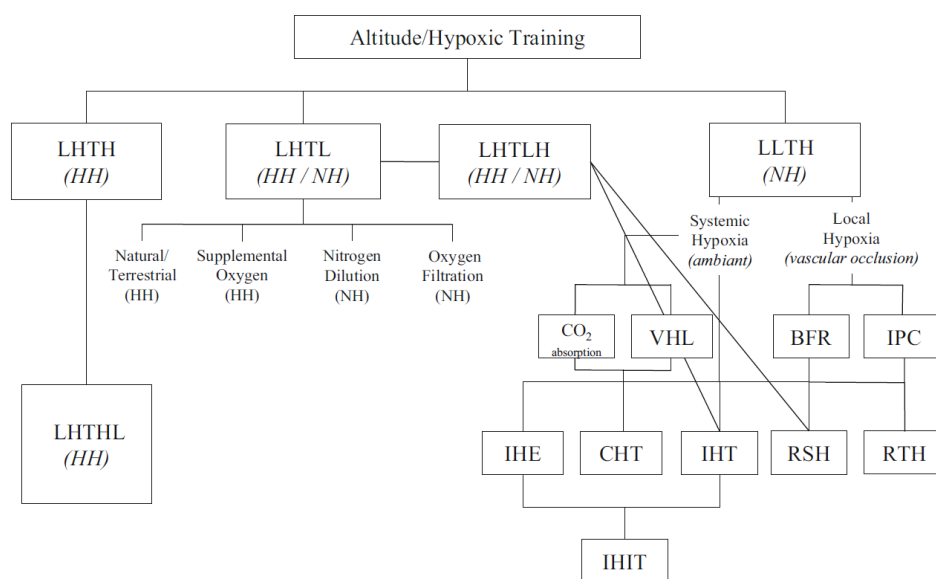
L'entraînement en altitude (ou hypoxique) est apparu avec les Jeux Olympiques de Mexico (1968) et a connu un intérêt grandissant (tableau 5) dans le but d'augmenter la performance au niveau de la mer (ou normoxique) ou pour permettre une acclimatation efficace en vue d'une compétition organisée en altitude.

**Tableau 6.** Evolution des méthodes d'entraînement en hypoxie à travers le temps.

Méthodes	Abréviation	Année	Sport	Publication
Vivre et s'entraîner en altitude	LHTH	1960's	Endurance	(Dill & Adams, 1971)
Interval-training en hypoxie	IHT	1960's	Endurance	(Roskamm et al., 1969)
Vivre en altitude et s'entraîner au niveau de la mer	LHTL	1997	Endurance	(Levine & Stray-Gundersen, 1997)
Renforcement musculaire en hypoxie	RTH	2000	Puissance	(Friedmann et al., 2003)
Répétition de sprints en hypoxie	RSH	2013	Intermittent (Sports collectifs, ou de raquette)	(Faiss, Leger, et al., 2013)
Vivre en altitude et s'entraîner au niveau de la mer et en altitude	LHTLH	2015	Intermittent (Sports collectifs, ou de raquette)	(Brocherie, Millet, et al., 2015)
Vivre en altitude et s'entraîner en altitude et au niveau de la mer	THTHL	2015	Endurance	(Rodriguez et al., 2015)

Le succès des méthodes « traditionnelles » - LHTH et LHTL (exposition chronique >12h/jour sur une période minimum de 10-12 jours) – repose principalement sur l’effet érythropoïétique (Girard, Brocherie, & Millet, 2017). Ces dernières ont été historiquement utilisées par les athlètes d’endurance dans le but d’améliorer leur performance au niveau de la mer (Millet, Roels, Schmitt, Woorons, & Richalet, 2010; Wilber, Stray-Gundersen, & Levine, 2007).

L’utilisation de l’hypoxie hypobarique ainsi que l’altitude simulée (hypoxie normobarique) lors d’exercice à intensité maximale ou proche de celle-ci sont de plus en plus populaires dans l’optique d’optimiser la performance dans les sports-collectifs (Girard et al., 2013). La dernière décennie a été marquée par le développement de méthodes innovantes s’appuyant sur la notion de « Vivre en bas – s’entraîner en haut » (cf. Figure 8), avec de nouvelles connaissances relatives à l’impact d’une exposition hypoxique sur les performances en sprint associées à des facteurs non hématologiques avec un rôle encore plus significatif sur la capacité de performance (Gore, Clark, & Saunders, 2007).



**Figure 8.** Panorama actualisé par Girard et al. (2017) des différentes méthodes d’entraînement en Altitude/Hypoxie utilisés par une variété d’athlètes. Adapté de (G. P. Millet, Faiss, Brocherie, & Girard, 2013) BFR : Restriction du flux sanguin (« Blood Flow Restriction »), CHT : Entraînement en hypoxie continu (« Continuous Hypoxic Training »), CO<sub>2</sub> absorption (Réinspiration avec un masque), HH (Hypoxie Hypobarique), IHE (Exposition intermittente à l’Hypoxie), IHIT (Exposition intermittente à l’Hypoxie pendant un travail intermittent), IHT : Entraînement hypoxique par intervalles, IPC : Pré-conditionnement ischémique, LHTH : Vivre haut – s’entraîner haut (« Live High –Train High »), LHTL : Vivre haut – s’entraîner bas (« Live high-train Low »), LLTH : vivre bas – s’entraîner haut (« Live Low – Train High), LHTHL : vivre haut – s’entraîner haut en étant en bas, LHTLH : vivre haut – s’entraîner au niveau de la mer, et en altitude, NH : hypoxie normobarique, RSH : répétition de sprint en hypoxie, RTH : Renforcement musculaire en hypoxie, VHL : hypoventilation volontaire à faible volume pulmonaire.

Le joueur et son encadrement disposent aujourd'hui d'outils et de méthodes d'entraînement divers et variés. Dans un contexte dense en périodes de compétitions, nous estimons qu'il faut notamment optimiser le temps d'entraînement en ciblant les qualités physiques à développer prioritairement avec les méthodes les plus adaptées. Le développement des capacités physiologiques en dehors du court doit prendre le moins de temps possible pour laisser de la disponibilité pour les habiletés techniques. Le challenge consiste à utiliser le stress physiologique le plus efficace pour une amélioration de la capacité à réitérer des hauts niveaux d'intensité soutenue par une récupération rapide et optimisée (Reid, Crespo, Lay, & Berry, 2007; Reid et al., 2016).

On croit généralement que l'amélioration de la condition physique, comme la vitesse, dépend d'un programme spécifique destiné à améliorer les paramètres neuromusculaires (Buchheit, Mendez-Villanueva, Quod, Quesnel, & Ahmaidi, 2010; Venturelli, Bishop, & Pettene, 2008), alors que les programmes de répétitions de sprints montraient un impact plus important sur les performances de sprint- navette unique et répétés (Buchheit, Mendez-Villanueva, Delhomel, Brughelli, & Ahmaidi, 2010; Fernandez-Fernandez, Zimek, Wiewelhove, & Ferrauti, 2012). Conjointement au développement de procédures d'évaluation innovantes et valides, l'entraînement en hypoxie s'avère potentiellement un levier cohérent pour la performance au tennis. L'ajout d'un stimulus hypoxique lors d'un exercice, se traduisant par une diminution plus marquée de la pression en O<sub>2</sub> dans le muscle (Hoppeler & Vogt, 2001), améliorerait l'efficacité du système neuromusculaire, notamment via des réponses transcriptionnelles augmentées (i.e., quantité d'ARNm impliqués dans le fonctionnement du métabolisme aérobie). Et ce, plus particulièrement lors d'exercices intermittents à haute intensité, puisque cela favoriserait des adaptations spécifiques (augmentation du nombre de capillaires par fibre, de la densité mitochondriale, de la concentration en myoglobine et de l'activité oxydative enzymatique) au niveau musculaire qui ne se produisent pas en condition normoxique ou alors à un degré moindre (Hoppeler & Vogt, 2001).

Alors que différentes méthodes d'entraînement en hypoxie sont envisageables, avec des protocoles plus ou moins contraignants, une équipe pionnière de l'UNIL (Faiss, Leger, et al.,



2013) a démontré la supériorité de la méthode RSH sur la capacité à repousser la baisse de production d'un haut niveau d'intensité physique, sur des efforts brefs. D'autres études ont exploré les effets de RSH sur la performance sportive intermittente de haute intensité (Brocherie, Girard, Faiss, & Millet, 2015; Gatterer et al., 2014; Goods, Dawson, Landers, Gore, & Peeling, 2015) et les avantages putatifs de RSH par rapport à un protocole similaire en normoxie (RSN) (Faiss, Leger, et al., 2013), sans que de effets sur la performance au tennis n'aient été encore abordé. RSH apparaît comme une stratégie d'entraînement prometteuse dans les sports de raquette pour éventuellement améliorer la performance liée au match (Faiss, Girard, & Millet, 2013).

Les effets de l'entraînement RSH ont déjà été évalués et des améliorations de la performance physique au niveau de la mer ont été mesurés (cf. Tableau 7).

Il a déjà été montré une amélioration de la perfusion sanguine au niveau musculaire (Faiss et al., 2015) et cérébral (Galvin, Cooke, Summers, Mileva, & Bowtell, 2013), suite à un cycle d'entraînement sous la forme RSH, à partir de la mesure des concentrations de désoxyhémoglobine ([HHb]) et du total hémoglobine / myoglobine ([tHb]). Les différences entre les concentrations maximales et minimales ont été définies comme l'amplitude de la variation (exprimée en % de la valeur basale) pour chaque sprint ( $\Delta[tHb]$ ,  $\Delta[HHb]$ ).  $\Delta[tHb]$  représente les variations de volume sanguin.. De ce fait il est utilisé comme indice de perfusion sanguine (Van Beekvelt, Colier, Wevers, & Van Engelen, 2001).  $\Delta[HHb]$  dépend du niveau d'extraction d'oxygène et reflète donc le niveau d'oxygénation locale (Kowalchuk, Rossiter, Ward, & Whipp, 2002).

#### **1.4.1 RSH et amélioration des qualités physiques**

Pour rappel le RSH consiste à effectuer un entraînement en hypoxie sous la forme d'efforts maximaux de courte durée ( $\leq 30$  s) entrecoupés de phases de récupération incomplète. RSH est notamment caractérisée par l'intensité maximale des efforts qui sollicitent un recrutement très élevé des fibres rapides. Les études connues à ce jour s'intéressant aux effets du RSH sur la performance montrent globalement des résultats positifs (Brocherie, Girard, Faiss, & Millet, 2017).

Dans la première étude publiée sur le RSH en 2013, la fatigue causant l'arrêt de l'exercice lors d'un test de répétition de sprints en normoxie apparaissait nettement plus tardivement après 4 semaines de RSH comparativement au même entraînement en normoxie (RSN) (Faiss, Leger, et al., 2013). Notre groupe de recherche a conduit une recherche similaire avec des skieurs de fond élités (Faiss et al., 2015). L'entraînement de répétition de sprints en normoxie (RSN) et en hypoxie (RSH) dans cette étude était particulièrement efficace puisque les skieurs amélioraient la puissance produite pendant les sprints de plus de 20% en 2 semaines et 6 séances seulement. Cette étude met surtout en lumière une amélioration de 57% du nombre de sprints répétés sur un ergomètre pour la double-poussée en ski de fond après le RSH alors que le groupe RSN ne réalisait pas plus de sprints (Faiss et al., 2015).

Dans une troisième étude, la puissance correspondant à 4 mmol.L<sup>-1</sup> de lactate dans le sang (pris comme indicateur du seuil lactique) était améliorée de plus de 7% chez des cyclistes après du RSH mais pas du RSN (Puype, Van Proeyen, Raymackers, Deldicque, & Hespel, 2013). Cependant, dans cette étude, les gains de puissance pendant un contre-la-montre de 10 min (+6-7 %) ou en termes de  $\dot{V}O_{2max}$  (+6%) étaient similaires entre les deux formes d'entraînement. Méthodologiquement, il convient de noter que les efforts étaient limités à 80% de la puissance maximale en sprint, ce qui a probablement limité les bénéfices additionnels du RSH.

Une étude plus spécifique réalisée auprès de joueurs de rugby de haut niveau montre un gain de 19% au « Yo-Yo Intermittent Recovery test Level 1 » (Yo-Yo IR1 test), après un cycle de RSH comparé au même entraînement en normoxie (Galvin et al., 2013). Par ailleurs, chez de jeunes footballeurs de bon niveau, un entraînement RSH vs. RSN sous forme de navettes aller-retour dans une chambre hypoxique a également induit un meilleur maintien de la vitesse lors de sprints répétés (Gatterer et al., 2014).

En outre, lorsque le modèle RSH a été appliqué à d'autres jeunes footballeurs des résultats probants ont aussi été observés avec notamment une vitesse plus élevée et un temps de sprints diminué lors d'un test de 10 sprints répétés de 30m (Brocherie, Girard, et al., 2015). Ces trois dernières études avec rugbymen et footballeurs soulignent l'intérêt d'ajouter un stress hypoxique lors de l'entraînement à base de sprints répétés.

**Tableau 7.** Synthèse des études publiées sur RSH.

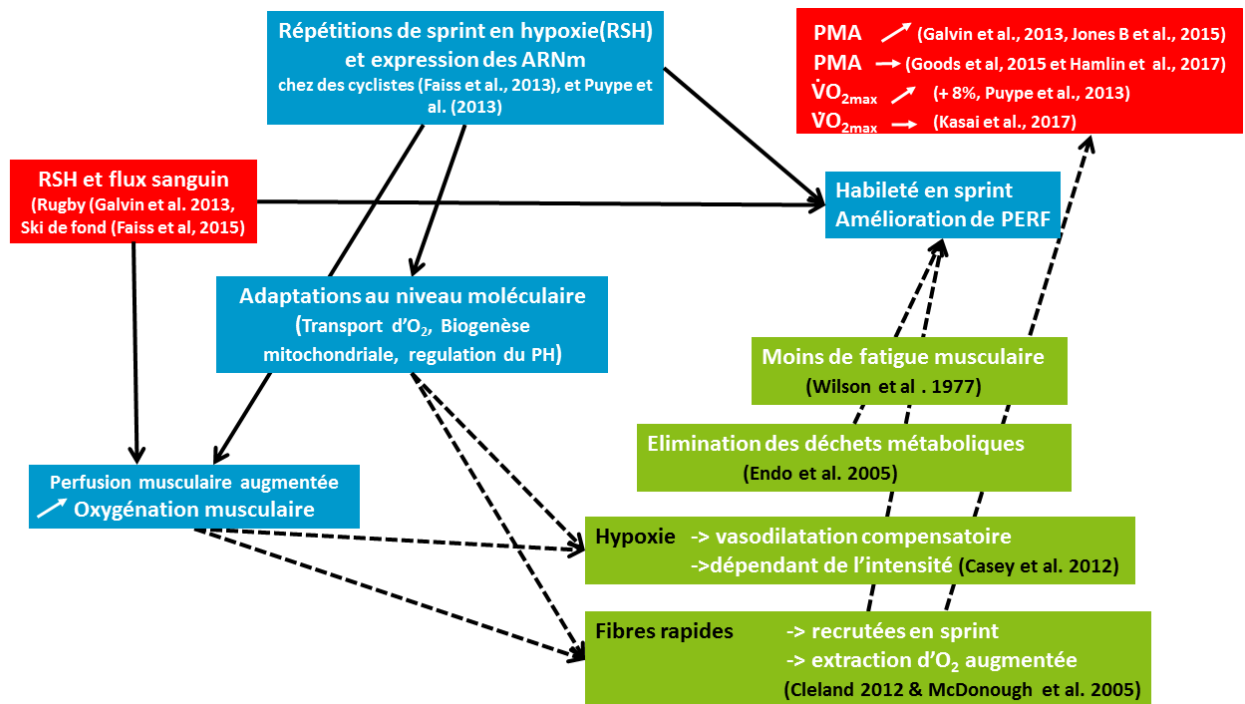
Auteur (Année)	Sujets	Protocole d'entraînement (séances, type, altitude, contenu)	Groupes	Différences significatives (P < 0,05)
Puype et al. (2013)	Cyclistes modérément entraînés	18 en 6 semaines, cyclisme, 3000 (NH). 4-9 sprints de 30 s à 80% du max avec 4,5 min de récupération entre les sprints.	RSH, N = 10 RSN, N = 10 CON, N= 10	+ <b>6 % Pmax sprint</b> , + <b>8 % <math>\dot{V}O_{2max}</math></b> , + <b>6 % 10-min Pmoy</b> , + <b>7% LT4</b> . + 5 % Pmax sprint, +6% $\dot{V}O_{2max}$ , + 6% 10 min Pmoy. Changementement NS
Galvin et al. (2013)	Joueurs de rugby	12 en 4 sem, course sur tapis roulant, 3500m (NH). 10 sprints de 6 s intercalés de 30 s de récupération	RSH, N= 15 RSN, N = 15	+ <b>33 % Yo-Yo IR</b> + 14 % Yo-Yo IR
Faiss et al. (2013)	Cyclistes modérément entraînés	8 en 4 sem, cyclisme, 3000m (NH). 3 séries de 5 sprints de 10 s intercalés avec 20 s de récupération. Minimum 5 min entre les séries	RSH, N = 20 RSN, N = 20 CON, N=10	+ 6 % Pmoy sprints, + <b>38% sprints en plus lors d'un RSA</b> . + 7 % Pmoy sprints, pas plus de sprints lors d'un RSA. Changements NS
Gatterer et al. (2014)	Joueurs de football	7-8 en 5 semaines, course, 3000 m (NH). 3 séries de 10 s de course en navettes de 4,5 m aller-retour avec 20 s de pause	RSH, N = 5	+ 20 % Yo-yo IR, - <b>38% pente courbe de fatigue lors de RSA</b> . + 21 % Yo-Yo IR, + 9 % pente courbe de fatigue lors de RSA.
Brocherie et al. (2015)	Joueurs de football	10 en 5 sem, course, 2900m (NH) 5 séries de 4 sprints de 5 s intercalés avec 45 s de récupération	RSH, N = 8 RSN, N = 8	- <b>4 % temps du 1<sup>er</sup> sprint</b> , - <b>4 % temps du sprint cumulé</b> - 2 % temps du 1 <sup>er</sup> sprint, - 2 % temps du sprint cumulé
Faiss et al. (2015)	Skieurs de fond très entraînés	6 en 2 sem, double-poussée ergomètre ski de fond, 3000m (NH)	RSH, N = 9 RSN, N = 8	+ 25% Pmax sprints, + <b>57 % sprints en plus lors d'un RSA</b> . + 21% Pmax sprints, pas plus de sprints lors d'un RSA
Kasai et al. (2015)	Joueuses de lacrosse	8 en 4 sem, 2 séries de de 10 sprints de 7 s intercalés de 30 s sur ergocycle (3000m, (NH))	RSH, N = 16 RSN, N = 16	+ <b>5 % Pmax des sprints sur ergocycle après RSH</b> vs. 1.5% en RSN + <b>9.7 % Pmoy</b> des sprints vs 6 % $\dot{V}O_{2max}$ n'a pas bougé de façon significative dans les 2 groupes
Montero et Lundby (2015)	Athlètes d'endurance modérément entraînés	12 en 4 sem, 4 séries de 5 sprints de 10 s sur ergocycle entrecoupés de 20 s de récupération.	Crossover RSN – RSH, N = 15	Des progrès sont observés avec les deux méthodes, sans différence entre les deux.
Goods et al. (2015)	Joueurs de football australien « semi –élite »	15 séances en 5 sem, 3 séries de 7 sprints de 5 s sur ergocycle (3000m, (NH))	RSH, N = 9 RSN, N = 10	+ 4.7 Pmax et + 10.3% Pmoy, pour le groupe RSH. + 8.6% Pmax et + 13.6% Pmoy des sprints sur ergocycle pour le groupe RSN ; - 1.1% Pmax et 1.4% Pmoy, pour le groupe contrôle. + 2,3% (RSH), + 1.8% (RSN), + 1.1% (Contrôle) sur le temps moyen des sprints (course) entre avant et après entraînement.
Hamlin et al. (2017)	Joueurs de rugby bien entraînés	6 séances en 3 sem suivies de 3 post-tests en 2 sem, puis 2 séances en 1 sem suivies de 2 post-tests en 2 sem. Chaque séance comportait 4 séries de 5 sprints de 5 s entrecoupés de 25 s de récupération active. 5 min entre les séries.	RSH, N = 8 RSN, N = 10	- <b>2.0 ± 2.4%</b> , - <b>2.2 ± 2.4%</b> , - <b>1.6 ± 2.4% RSA Post 3, Post 4, Post 5, respectivement</b> . La perte de vitesse lors de 8 sprints répétés était significativement améliorée après RSH. Pas de différence entre les groupes sur les performances du YYIR1.
Kasai et al. (2017)	Hommes sprinters universitaires	5 jours consécutifs en hypoxie (3000m) vs normoxie, 2 sessions / jour.matin, Matin : RS (5 x 6 s –24 s) 3 x + (4 x 20 s- 5-15 min s); Après-midi : 3 séries de 5 x 6s sprint – 36 s + 1 série 4 x 20 s – 40 s	RSH, N = 10 RSN, N = 9	+3% Fréquence max de pédalage, et de la Pmax seulement dans le groupe hypoxie. Les <b>augmentations de glycogène musculaire</b> (RSH : + 79.9 ± 10.4% ; RSN : + 56.3 ± 11.2 %) et <b>PCr</b> (HYP : 3.9 ± 1.4% ; RSN : 2.7 ± 1.1%). Non significatif entre les 2 groupes.

Les différences significatives entre les groupes sont présentées en gras ( $P < 0.05$ ). HH, hypoxie hypobarique ; NH, hypoxie normobarique ; RSN, entraînement de répétition de sprints en normoxie ; CON, groupe contrôle sans entraînement spécifique ; RSA, test de la capacité à répéter des sprints ; NS, non significatif ( $P > 0,05$ ) ; Pmax, puissance mécanique maximale ; Pmoy, puissance mécanique moyenne ; LT4, puissance correspondant à une concentration de lactate de 4 mmol.l<sup>-1</sup>, Yo-Yo IR, performance lors d'un test intermittent Yo-Yo IR ; PCr, Phosphocréatine.

#### **1.4.2 Les mécanismes sous-jacents à l'efficacité de RSH.**

Au-delà des paramètres de performance physique mesurés, les mécanismes physiologiques ont été observés et discutés dans la littérature autour d'éléments favorisant la performance au tennis. L'intérêt du RSH est certainement lié à la capacité dont les chercheurs ont fait preuve pour utiliser le potentiel attendu des adaptations physiologiques (modifications à l'échelle musculaire et du flux sanguin) liées au stress hypoxique ajouté à des intensités d'exercices efficaces. RSH trouve son efficacité suite à des niveaux de perfusion sanguine améliorés qui, à leur tour, favorisent l'utilisation de l'O<sub>2</sub> par les fibres rapides. L'exercice en hypoxie est connu pour induire une vasodilatation (ou dilatation des vaisseaux sanguins) compensatoire qui tend à ajuster efficacement l'apport d'O<sub>2</sub> au niveau musculaire (Casey & Joyner, 2012). En hypoxie, les fibres rapides à l'instar des fibres lentes vont certainement bénéficier d'une perfusion sanguine plus accrue (par la vasodilatation) dans la mesure où ces fibres rapides ont intrinsèquement une meilleure capacité d'extraction de l'O<sub>2</sub> (McDonough, Behnke, Padilla, Musch, & Poole, 2005). Si on oublie souvent que certaines fibres sont oxydatives, dans le cas de sprints en hypoxie, ces fibres vont mieux exploiter des faibles niveaux d'O<sub>2</sub> du fait d'une extraction plus efficace (Cleland, Murias, Kowalchuk, & Paterson, 2012).

Il a également été montré récemment que l'oxygénation cérébrale s'adapte au stress hypoxique associé à la répétition de sprints sur ergocycle, en instantané (Curtelin et al., 2018), et après 12 sessions de 10 sprints de 6 s sur tapis roulant non motorisé en 4 semaines (Galvin et al., 2013). La capacité à maintenir une puissance élevée lors de la répétition des efforts semble liée avant tout à la disponibilité de [PCr] et des ions H<sup>+</sup> pendant des sprints répétés. La capacité à maintenir une puissance élevée lors de la répétition des efforts semble pourtant liée avant tout à la disponibilité de [PCr] et à sa resynthèse plutôt qu'au contrôle de pH musculaire (Mendez-Villanueva, Edge, Suriano, Hamer, & Bishop, 2012). Cependant, les deux expérimentations incluant des biopsies musculaires ont quand même observé une meilleure capacité tampon ou tout du moins une régulation positive des gènes impliqués dans le maintien du pH (Faiss, Leger, et al., 2013; Puype et al., 2013).



**Figure 9.** Mécanismes sous-jacents à l'efficacité de RSH, adapté de (Millet, Brocherie, Faiss, & Girard, 2015). O<sub>2</sub> : Oxygène; ARNm : Acide ribonucléique messager ; PH : Unité de mesure d'acidité.

Les réponses de l'entraînement en altitude sont complexes parce que le stress hypoxique et de l'entraînement sont combinés (Schmitt, Millet, et al., 2006). L'hypoxie représente un facteur de stress supplémentaire avec la réduction de la PIO<sub>2</sub> (pression partielle de l'oxygène inspiré) et une diminution transitoire des activités parasymphatiques et nerveuses sympathiques (Kanai, Nishihara, Shiga, Shimada, & Saito, 2001; Perini & Veicsteinas, 2003; Sevre et al., 2001). A ce jour aucune publication ne concerne l'effet de RSH sur l'activité neurovégétative.

### 1.4.3 Quel niveau d'altitude adopter ?

Pour le stimulus hypoxique, il semblerait qu'un stress correspondant à une altitude de 3000m soit plus adapté qu'une altitude de 2000m (sévérité ne permettant pas nécessairement un niveau de stress suffisant) d'une part ou de 4000m d'autre part (diminution de performance marquée) (Goods, Dawson, Landers, Gore, & Peeling, 2014).

La répétition de sprints sur tapis roulant à différentes altitudes simulés (0-4000m) chez des joueurs de sports collectifs ont permis d'établir une relation « dose-réponse ». Par exemple, lors de l'exécution de 10 sprints de 6 s (30s de récupération) à des fractions inspirées en O<sub>2</sub> de 12%, 13%, 14%, 15% et 21%, il a été observé que si l'amplitude des réponses physiologiques (par exemple, O<sub>2</sub> et SpO<sub>2</sub>, activation et oxygénation musculaire) étaient d'autant plus affectée que

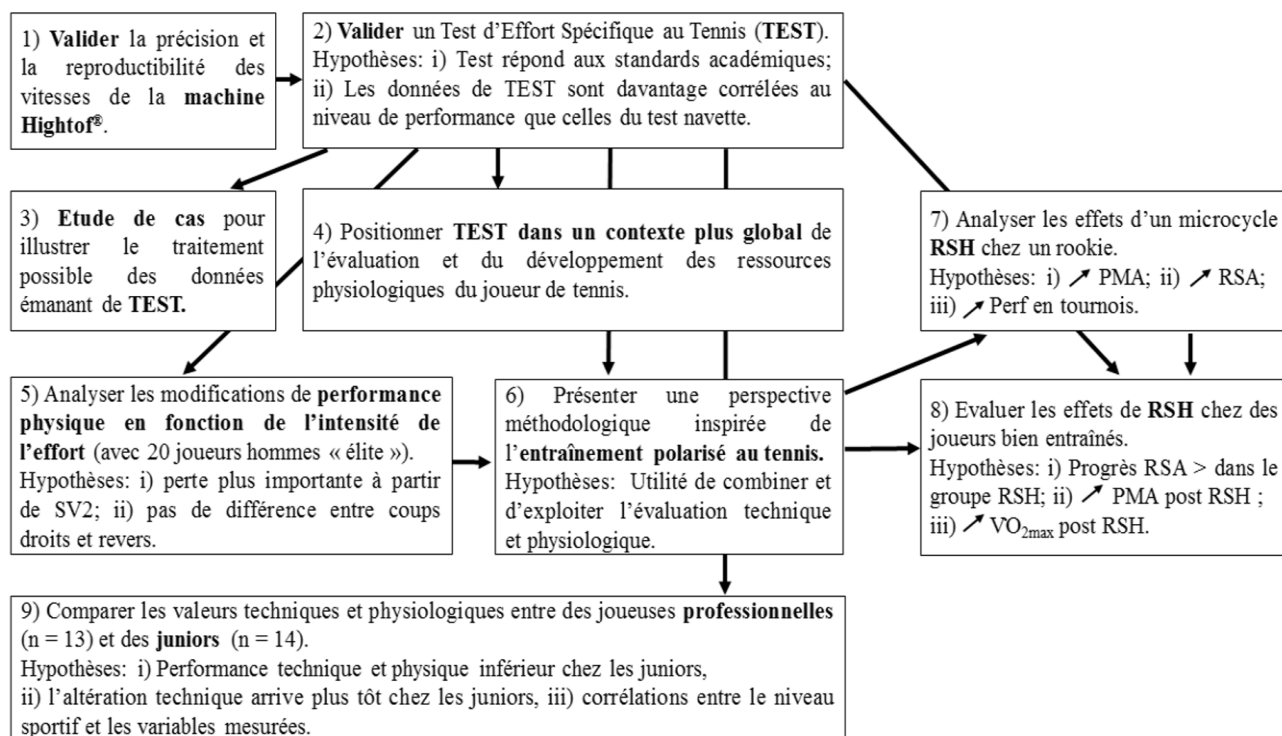
la sévérité de l'altitude augmentait, seule la condition d'hypoxie la plus sévère induisait une plus large diminution de performance (IDP ~10%) par rapport à la condition de référence (~5%) (Bowtell, Cooke, Turner, Mileva, & Sumners, 2014). Dans l'étude de Goods et al. (2014), la comparaison de l'effet de 4 altitudes simulées (0, 2000m, 3000m, et 4000m) sur la RSA (3 blocs de 9 sprints de 4 s) a également montré que, comparativement aux autres altitudes, seule la puissance moyenne produite lors du dernier bloc de sprints à 4000m était moindre (Goods et al., 2014)

## **1.5 But général de la thèse**

Notre travail consiste à valider de nouveaux éléments qui peuvent contribuer à l'élaboration d'une méthodologie d'entraînement du joueur de tennis de haut niveau. Au-delà de la validation d'un test d'effort et d'une méthode d'entraînement en hypoxie, il s'agit d'intégrer différentes variables techniques et physiologiques à une approche qui pourrait se rapprocher de l'entraînement polarisé (Seiler & Kjerland, 2006). Ce type de gestion de la charge de travail n'a jamais été envisagé dans la littérature qui s'intéresse à ce sport. L'analyse des données cherchera également à déterminer des points-clés qui marqueront les éléments significatifs d'un niveau de performance en distinguant le tennis féminin du tennis masculin.

### **1.5.1. Buts et hypothèses des études constituant cette thèse.**

Les études menées tout au long de cette thèse ont répondu à la volonté de construire les bases d'une méthode d'entraînement et se sont adaptées aux résultats obtenus au fil des expérimentations (cf. [figure 10](#)).



**Figure 10.** Canevas des buts et hypothèses des études ayant donné lieu à publication

## ***Chapitre 2 :***

### ***Résumé des résultats expérimentaux***

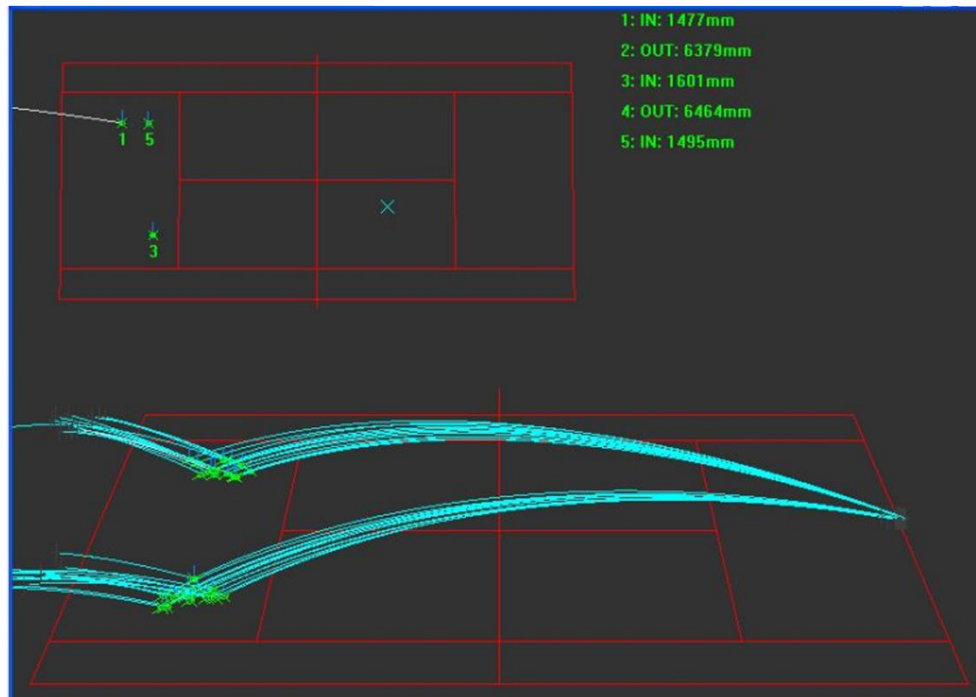


## 2. Résumé des résultats expérimentaux

### 2.1. Validation d'un test d'effort spécifique au tennis (TEST) avec frappes de balle chez des joueurs élite.

#### 2.1.1 Précision et reproductibilité d'une nouvelle machine lance-balles

La précision de la machine lance-balles utilisée est identique à droite et à gauche du court (0.63 ± 0.39 vs 0.63 ± 0.34 m).



**Figure 11-** Impacts de balles mesurés avec « Hawk-Eye » lors de l'expérimentation (e.g., 11<sup>ème</sup> palier, 26 balles.min<sup>-1</sup>)

La vitesse de balle utilisée pour le test est  $86.3 \pm 1.5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  et  $86.5 \pm 1.3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  pour le côté droit et le côté gauche, respectivement. Le coefficient de variation pour la vitesse produite est compris entre 1 et 2% à tous les paliers (fréquence d'envois comprise entre 10 et 30 balles. min<sup>-1</sup>).

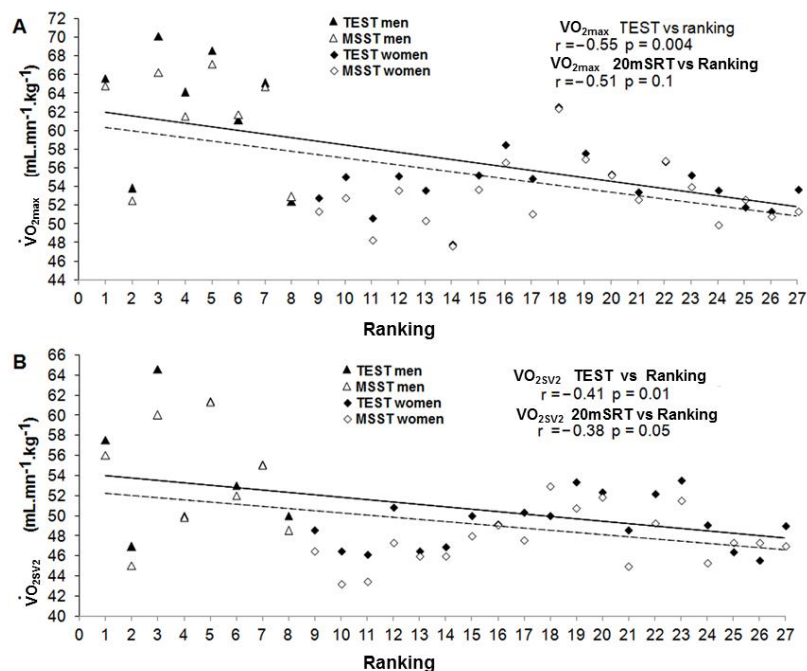
Conclusion : la précision et la fiabilité de cette nouvelle machine lance-balles apparaissent satisfaisantes pour les tests de terrain et l'entraînement (*in JSSM*).

Pour plus de détails, voir Chapitre 6, Article 1.

#### 2.1.2 Fiabilité et spécificité de TEST

Lors de l'étude comparative entre TEST et le test navette (20m SRT), nous n'avons pas trouvé de différences significatives entre les valeurs de  $\dot{V}O_{2 \text{ max}}$ . En revanche, les valeurs de  $\dot{V}O_2$  à

SV2 et à PMA apparaissent plus spécifiques avec TEST dans la mesure où la corrélation avec le niveau de performance est plus forte [( $r = -0.41$ ;  $P = 0.01$  et  $r = -0.55$ ;  $P = 0.004$ ) vs ( $r = -0.38$ ;  $P = 0.05$  et  $r = -0.51$ ;  $P = 0.1$ )] (cf. [Figure 12](#))



**Figure 12** – Relations entre le classement des joueurs (ranking de 1 à 27) avec  $\dot{V}O_{2max}$  (A), et  $\dot{V}O_2$  à SV2 ( $\dot{V}O_{2SV2}$ ). Les lignes pointillées et les pleines représentent respectivement TEST et le 20mSRT.

Conclusion : L'évolution des paramètres physiologiques est comparable entre les 2 tests incrémentaux. Les corrélations de  $\dot{V}O_{2max}$  et  $\dot{V}O_{2VT2}$  avec le niveau de jeu sont modérés pour TEST et 20mSRT. (*in PlosOne*).

Pour plus de détails, voir Chapitre 7, Article 2.

## 2.2. Analyse et applications pratiques des données issues de TEST

### 2.2.1 TEST : Etude de cas d'un joueur élite.

A partir de TEST, nous pouvons envisager des applications pratiques, à dominante technique ou physique, ainsi qu'une meilleure gestion de la charge de travail et de ses incidences sur l'état général du joueur (*in ITF Coaching & Sport Science Review*).

**Tableau 8.** Paramètres de la performance technique mesurés pendant TEST chez un joueur élite.

palier	VO <sub>2</sub> ml.min <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup>	Lactate mmol.l <sup>-1</sup>	Vitesse Coup Droit km.h <sup>-1</sup>	Vitesse Revers km.h <sup>-1</sup>	Précision Coup Droit % in zone	Précision Revers % in zone	Perftennis Coup Droit (% x V CD)	Perftennis Revers (% x V Rev)
1	40.2	1	122	113.4	50	40	61	45.4
2	41.5	1	132	113.6	66	42	87	47.7
3	43.9	1.1	126	120.0	78	64	98	76.8
4	45.1	1.2	133	123.5	75	69	99	85.2
5	47.6	1.3	128	119.2	66	60	84	71.5
6	50.4	1.4	135	123.8	80	60	108	74.3
7	53.2	1.6	131	117.7	82	55	108	64.7
8	55.6	2.1	125	123.2	65	57	81	70.2
9	57.4	3	122	117.0	66	54	80	63.2
10	59.6	4.2	125	110.4	60	60	75	66.2
11	60.5	5.7	123	117.9	59	61	73	71.9
12	61.5	7.9	126	112.6	65	55	82	61.9
13	62.2	11.8	115	104.3	60	50	69	52.2

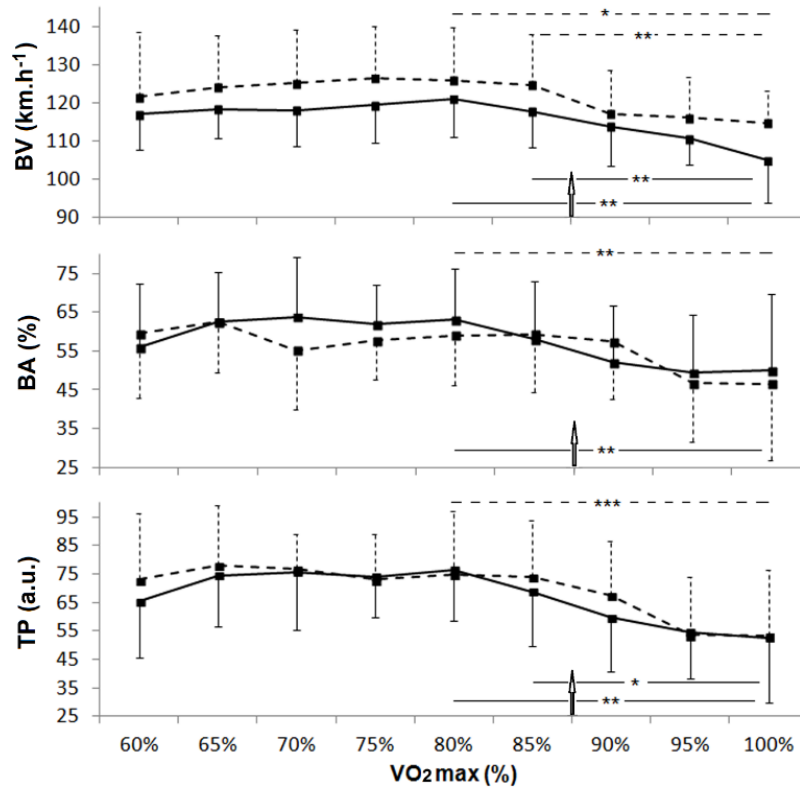
V CD, Vitesse de balle en coup droit ; V Rev, Vitesse de balle en revers ; % in zone, % de balle dans la zone de précision définie dans TEST; , Zone 1; , Zone 2 ; , Zone 3. (cf. Figure 15)

Conclusion : A travers TEST et ses applications, nous proposons une approche globale afin d'éviter la redondance des sollicitations physiologiques.

Pour plus de détails, voir Chapitre 8, Article 3.

### 2.2.2 Adaptations techniques pendant TEST chez des joueurs de tennis Elite

Nous observons une perte de la performance technique à partir de 80 %  $\dot{V}O_{2max}$  lors de TEST (cf. Figure 13), et il apparait que cette perte est notamment due à une dégradation de la précision des frappes de balles. La performance technique (Précision x Vitesse) est inversement corrélée à la concentration de lactate ( $r = -0.51$ ;  $P = 0.008$ ). La vitesse de balle en coup droit est 5,2% supérieure à celle du revers ( $P = 0.042$ ).



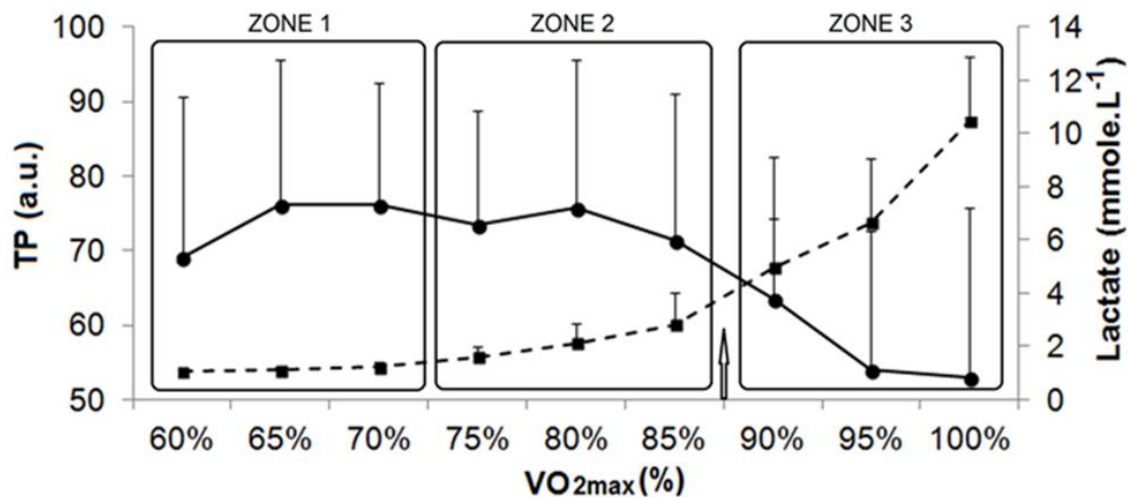
**Figure 13.** Changements de vitesse de balle (BV, A), précision (BA, B), et performance technique (TP, C) en fonction de l'intensité de l'exercice (% $\dot{V}O_{2max}$ ), en coup droit (pointillés) et en revers (traits continus). La flèche verticale indique SV2.

Conclusion : TEST offre la possibilité d'évaluer la correspondance entre des paramètres physiologiques et techniques. Chez des joueurs élite, l'altération progressive de la performance technique apparaît à partir de 80%  $\dot{V}O_{2max}$ . (*in MSSE*).

Pour plus de détails, voir Chapitre 10, Article 5.

### 2.2.3 Vers un entraînement polarisé en tennis? Intérêt d'une approche combinant évaluations techniques et physiologiques lors d'un nouveau test incrémental sur le terrain.

A partir de la réalisation de TEST, nous proposons une méthodologie de l'entraînement selon une répartition des intensités selon 3 zones, directement inspirée d'une approche dite « polarisée », avec ~ 70% passé en zone 1 (cf. [Figure 14](#)). Il s'agit également de combiner des objectifs physiques et techniques.



**Figure 14.** Zones d'intensité et variations de l'indice de performance tennistique (TP) (ligne continue) et de la lactatémie sanguine (ligne pointillée) en fonction de l'intensité de l'exercice (% de  $\dot{V}O_{2max}$ ). Zone 1 : intensité inférieure à 70 % de  $\dot{V}O_{2max}$  ; zone 2 : intensité entre 75 % et 87 % de  $\dot{V}O_{2max}$  ; zone 3 : intensité supérieure à 87 % de  $\dot{V}O_{2max}$ . La flèche verticale indique SV2.

**Tableau 9.** Modèle de protocoles d'entraînement spécifique sur le court visant à optimiser la capacité aérobie et l'efficacité technique chez les joueurs de tennis de haut niveau.

Zone 1	Zone 2	Zone 3
Palier 16-22 balles.min <sup>-1</sup> $\leq 70\% \dot{V}O_{2max}$ BA ~70% BV ~ 120 km.h <sup>-1</sup> < 80% FC <sub>max</sub> . [La] < 2 mmol.L <sup>-1</sup>	Palier 22-24 balls.min <sup>-1</sup> Entre 75%-87% $\dot{V}O_{2max}$ BA < 60% ; BV < 120 km.h <sup>-1</sup> 80%-90% FC <sub>max</sub> . 2 mmol.L <sup>-1</sup> < [La] < 4 mmol.L <sup>-1</sup>	Palier 25-29 balls.min <sup>-1</sup> $\dot{V}O_2 \geq 87\% \dot{V}O_{2max}$ BA < 60% BV < 120 km.h <sup>-1</sup> > 90% FC <sub>max</sub> [La] > 4 mmol.L <sup>-1</sup>

$\dot{V}O_{2max}$ , Consommation maximale d'oxygène; BA, précision des frappes; BV, vitesse de balle; FC<sub>max</sub>, fréquence cardiaque maximale.

Pour plus de détails, voir Chapitre 11, Article 6.

#### 2.2.4 Comparaison des données techniques et physiologiques mesurées pendant TEST entre des joueuses professionnelles classées à la WTA et des juniors classés à l'ITF junior

Vingt-sept joueuses (n = 14 et 13 pour les juniors et les professionnelles, respectivement) ont pratiqué TEST.

1°) Le palier correspondant au deuxième seuil ventilatoire (+20,0%,  $P = 0.027$ ), le temps total de maintien (+18,9%,  $P = 0.002$ ) et  $\dot{V}O_{2max}$  (+12,4%,  $P = 0.007$ ) étaient plus élevés chez les professionnels que chez les juniors.

2°) Le pourcentage relatif de la fréquence cardiaque maximale était plus faible à la fois au premier seuil ventilatoire (-4,7%,  $P = 0.014$ ) et au second (-1,3%,  $P = 0.018$ ) chez les professionnels.

3°) La vitesse de la balle en revers était le seul paramètre technique qui affichait des valeurs plus grandes (+7,1%,  $P = 0.016$ ) chez les professionnels.

**Tableau 10.** Variables physiologiques (A) et paramètres techniques (B) pendant TEST chez des joueuses Juniors et Professionnelles.

A	Junior	Professional	P value	ES
Palier à SV1	3.1 ± 1.2	3.2 ± 1.0	0.595	0.09
% $\dot{V}O_{2max}$ à SV1	78.8 ± 8.5	73.6 ± 5.3	0.070	<b>-0.73</b>
Palier à SV2	<b>6.0 ± 1.5</b>	<b>7.2 ± 1.2</b>	<b>0.027</b>	<b>0.88</b>
% $\dot{V}O_{2max}$ à SV2	90.1 ± 4.6	90.5 ± 4.6	0.662	0.09
Dernier palier	<b>9.4 ± 1.4</b>	<b>10.8 ± 1.4</b>	<b>0.033</b>	<b>1.00</b>
TTE (s)	<b>779 ± 107</b>	<b>926 ± 111</b>	<b>0.002</b>	<b>1.35</b>
MAF (balles.min <sup>-1</sup> )	<b>24.4 ± 1.4</b>	<b>25.8 ± 1.4</b>	<b>0.010</b>	<b>1.00</b>
$\dot{V}O_{2max}$ (mL.min <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> )	<b>51.6 ± 4.2</b>	<b>54.9 ± 3.3</b>	<b>0.049</b>	<b>0.88</b>
$\dot{V}O_{2max}$ (L.min <sup>-1</sup> )	<b>3069 ± 460</b>	<b>3448 ± 361</b>	<b>0.007</b>	<b>0.91</b>
[La <sub>max</sub> ] (mMol.L <sup>-1</sup> )	<b>8.7 ± 2.3</b>	<b>12.1 ± 4.4</b>	<b>0.006</b>	<b>0.98</b>

B	Junior	Professional	P value	ES
BVf (km.h <sup>-1</sup> )	106.6 ± 11.4	111.4 ± 7.6	0.219	0.49
BAf (% in zone)	57.6 ± 12.7	58.2 ± 9.0	0.887	0.05
TPf (a.u)	61.6 ± 15.8	64.2 ± 13.6	0.661	0.18
BVb (km.h <sup>-1</sup> )	<b>102.2 ± 6.7</b>	<b>109.5 ± 7.9</b>	<b>0.016</b>	<b>1.00</b>
BAb (% in zone)	53.1 ± 12.7	60.4 ± 8.5	0.096	0.67
TPb (a.u)	<b>55.0 ± 16.1</b>	<b>66.6 ± 12.6</b>	<b>0.049</b>	<b>0.80</b>
BV <sub>mean</sub> (km.h <sup>-1</sup> )	<b>104.4 ± 8.6</b>	<b>110.4 ± 7.1</b>	0.062	<b>0.76</b>
BA <sub>mean</sub> (% in zone)	55.4 ± 11.5	59.2 ± 7.1	0.310	0.39
TP <sub>mean</sub> (a.u)	58.3 ± 14.9	65.9 ± 11.2	0.153	0.57

Les valeurs sont présentées sous forme de moyenne ± écart-type. ES, effect size  
TTE, temps de maintien dans le test; MAF, fréquence maximale aérobie; BVf, vitesse de balle en coup droit; BAf, précision en coup droit; TPf, performance technique en coup droit; BVb, vitesse de balle en revers; BAb, précision en revers; TPb, performance technique en revers; BV<sub>mean</sub>, vitesse de balle moyenne; BA<sub>mean</sub>, précision moyenne; TP<sub>mean</sub>, performance technique moyenne.  
TP est le produit de BA x BV et s'exprime en unités arbitraires (a.u) en coup droit et en revers.

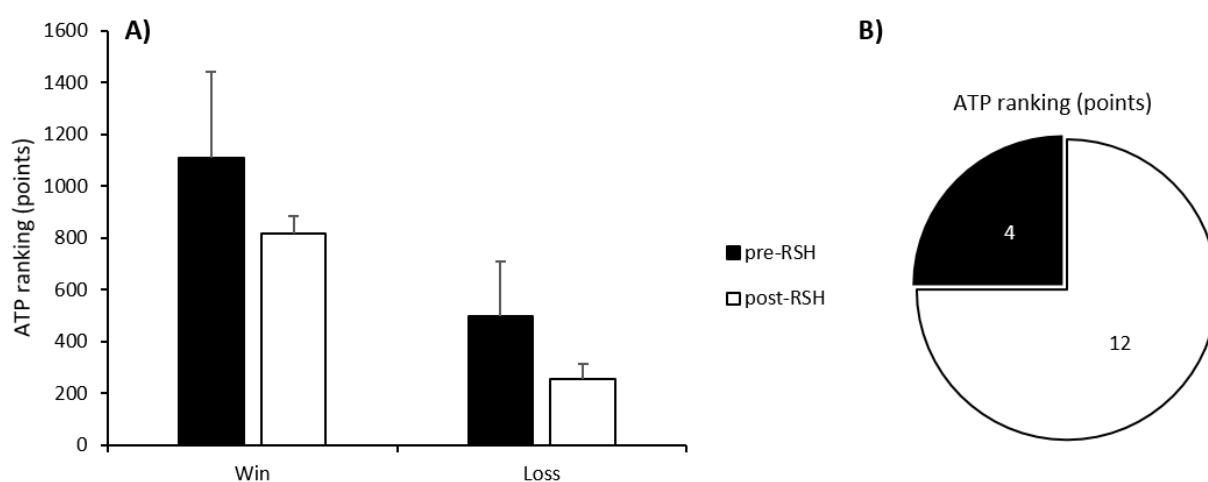
Conclusion : Les joueuses professionnelles disposent d'une meilleure base aérobie et jouent plus vite en revers.

Pour plus de détails, voir Chapitre 14, [Article 9](#).

### 2.3 L'utilisation de la nouvelle méthode RSH améliore les paramètres spécifiques de la performance au tennis

#### 2.3.1 Effets d'un microcycle de répétition de sprints en hypoxie chez un jeune joueur professionnel (in *International Journal of Sports Science and Coaching*).

1°) En comparant les résultats des 4 tournois qui ont précédé avec les 4 tournois qui ont suivi le cycle RSH, on constate que ce joueur est passé de 4 points ATP obtenus avant vs 12 points ATP après. Si nous regardons le niveau des adversaires, en considérant le meilleur classement obtenu à l'ATP pour chacun, nous sommes passés de 4 victoires avec un classement ATP moyen de  $1109 \pm 334$  à 9 victoires face à un niveau moyen de  $818 \pm 213$ , pour 4 défaites face à des joueurs d'un niveau moyen avant de  $500 \pm 68$  vs  $256 \pm 58$ .



**Figure 15.** Comparaison des classements ATP des adversaires (A) et gain de points ATP par le participant (B) avant (pre) et après (+21 jours) une période de 14 jours d'entraînement qui intègre 6 séances RSH.

2°) Les résultats obtenus en post- 2, c'est-à-dire 21 jours après la fin du protocole, sont beaucoup plus en faveur de RSH que ceux obtenus 48h après, en post-1.

**Tableau 11.** Niveau physique avant (Pre) et après (Post) (+3 jours et +21 jours) une période de 14 jours d'entraînement qui intègre 6 séances RSH

	Speed pré %	Best Sprint RSA %	Total time RSA %	Yo-Yo Test duration %	VMA%
Pre					
Post-1	2.56	0.97	0.55	-21.43	-2.47
Post-2	-4.49	-2.58	-3.12	21.43	0.71

Conclusion : A l'issue d'un cycle de 14 jours comprenant 6 séances RSH, le joueur a amélioré ses performances physiques (RSA et PMA), ainsi que ses résultats en compétition.

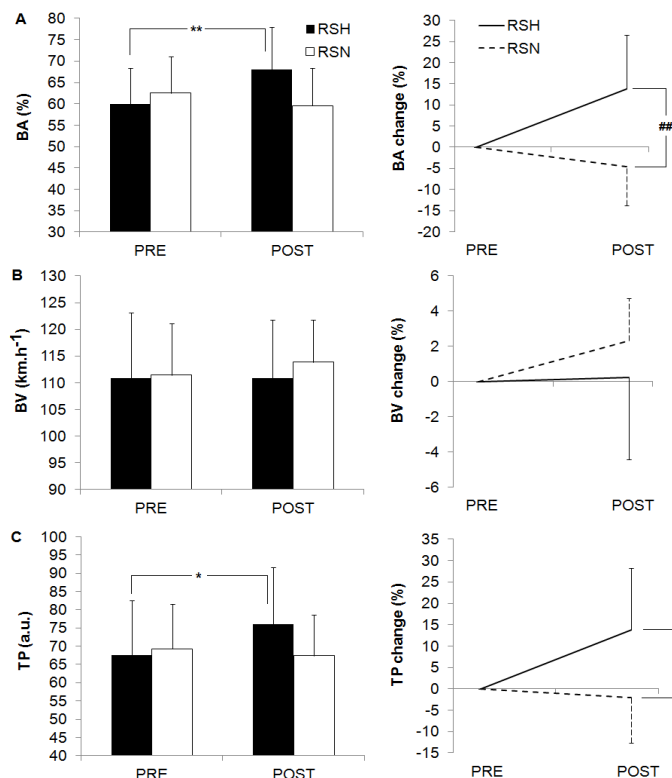
Pour plus de détails, voir Chapitre 12, [Article 7](#).

### 2.3.2 Effets de la répétition de sprint en hypoxie chez des joueurs de tennis bien entraînés.

1°) L'apparition de SV2 et du palier maximal (TTE) apparaît plus tard pour RSH vs RSN, lors du test spécifique ( $14.6\% \pm 3.7\%$ ,  $P < 0.001$  vs  $7.9\% \pm 5.1\%$ ,  $P = 0.002$  et  $23.6\% \pm 11.3\%$ ,  $P < 0.001$  vs  $10.9\% \pm 8.4\%$ ,  $P = 0.004$ , pour SV2 et TTE respectivement). Dans le même contexte, les autres valeurs physiologiques n'évoluent pas de façon significative ( $\dot{V}O_2$ , FC, Ventilation, [La]) dans les deux groupes.

2°) La précision des frappes et la performance technique (Précision x Vitesse) sur l'ensemble du test augmentent davantage et significativement dans le groupe RSH vs RSN ( $13.79\% \pm 12.75\%$ ,  $P = 0.013$  vs  $-4.59\% \pm 9.13\%$ ,  $P = 0.155$  and  $13.85\% \pm 14.37\%$ ,  $P = 0.026$  vs  $-2.07\% \pm 10.53$ ,  $P = 0.441$ ). A 100%  $\dot{V}O_{2max}$ , la précision et la performance technique ont augmenté davantage pour RSH vs. RSN entre l'avant et l'après protocole d'entraînement (  $33.57\% \pm 37.27\%$ ,  $P = 0.013$  vs  $5.11\% \pm 23.79\%$ ,  $P = 0.595$  and  $28.01\% \pm 41.78\%$ ,  $P = 0.041$  vs ,  $3.70\% \pm 22.42\%$ ,  $P = 0.703$ , pour la précision et la performance technique, respectivement).





**Figure 16.** Comparaison Pre vs Post entraînement et RSH vs. RSN, à travers les évolutions des vitesses de balle (BV) (A), de la précision (BA) (B) et de la performance technique (TP = BA x BV) (C). \*  $P < 0.05$ , différence significative vs Pre-. \*\*  $P < 0.01$ , différence significative vs Pre-. \*\*\*  $P < 0.001$ , différence significative vs Pre-. #  $P < 0.05$ , interaction temps × condition. ##  $P < 0.01$ , interaction temps × condition.

3°) On observe également une corrélation modérée ( $r = 0.59$ ,  $P < 0.01$ ) entre les évolutions (exprimées en %) de la durée d'effort maximal et le niveau de précision mesurée pendant le test spécifique.

Conclusion : Un cycle de 12 jours comprenant 5 séances RSH améliore la PMA, ainsi que la performance technique grâce à un gain de précision sur l'ensemble du test, sans baisse de vitesse de balle, y compris à 100%  $\dot{V}O_{2max}$ .

Pour plus de détails, voir Chapitre 13, [Article 8](#).

## ***Chapitre 3***

### ***Discussion***

### **3. Discussion.**

L'activité tennis et son circuit professionnel suscitent beaucoup d'intérêts. Le caractère itinérant, avec une longue partie de la saison consacrée à la compétition, a notamment pour conséquence de rendre limitées les périodes pendant lesquelles les joueurs peuvent développer leurs capacités physiques. De ce fait, il apparaît indispensable de rendre les démarches d'évaluation et d'entraînement physique les plus efficaces possibles. Il s'agit d'optimiser la fiabilité et l'intérêt des informations récoltées ainsi que les procédures d'entraînement, dans un temps maîtrisé.

La multiplication des techniques d'entraînement au tennis amène nécessairement à une réflexion sur l'optimisation du temps et des moyens utilisés. Comment faire cohabiter les techniques de développement de la force avec la vitesse, l'endurance et la maîtrise technique? Nous proposons une approche qui combine le développement des capacités physiologiques et de la maîtrise technique à partir d'une analyse de l'activité et de TEST.

Dans un premier temps, nous questionnerons les éléments proposés dans l'introduction au sujet de l'analyse de l'activité. Puis nous verrons en quoi nos résultats ont permis de disposer d'une modalité d'évaluation aboutie au regard des spécificités qui font la performance de haut niveau des joueurs de tennis. L'analyse des résultats de TEST permet également d'adapter les contenus d'entraînement en fonction de paramètres techniques et physiologiques individualisés. Enfin, nous montrerons que TEST a permis de mettre en évidence les effets positifs de la méthode RSH sur la capacité de performance des joueurs de tennis.

#### **Tennis de haut niveau adultes : dominante aérobie ou anaérobie ?**

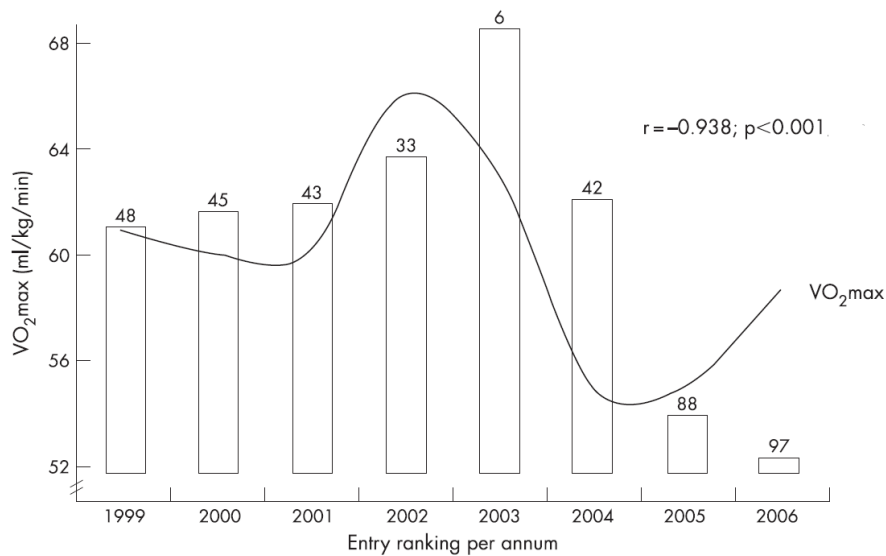
La littérature actuelle souligne une concomitance des systèmes de production d'énergie indispensable à la contraction musculaire (Groppe & Roetert, 1992; König et al., 2001). König et al (2001) considèrent que la resynthèse d'ATP et de phosphocréatine est essentiellement assurée par le système oxydatif mitochondrial.

Une relation étroite a été établie entre [La] et le nombre de coups joués lors d'un point en match, ainsi qu'avec la durée de celui-ci ( $r = 0.80$ ,  $P < 0.05$ , dans les 2 cas), en compétition avec des joueurs professionnels (Mendez-Villanueva et al., 2010).

L'intérêt porté sur la  $\dot{V}O_{2max}$  pour le joueur de tennis de haut niveau est discutable, et discuté. Dans ce sens, Kovacs (2007) estime que pour un joueur de haut niveau, il est important de disposer d'une  $\dot{V}O_{2max} > 50 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ . En revanche, il suppose qu'un haut niveau de  $\dot{V}O_{2max}$  ( $> 65 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) n'améliorerait pas la performance sur le court par rapport à une  $\dot{V}O_{2max}$  de  $55 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Il suggère de consacrer le temps d'entraînement à d'autres thèmes dès lors que cette valeur a été atteinte par le joueur. Si l'atteinte d'un niveau élevé de  $\dot{V}O_{2max}$  ne constitue pas un critère discriminant de la performance contrairement à des activités continues de type aérobie, Bergeron et al. (1991) indiquent qu'avec un niveau élevé de  $\dot{V}O_{2max}$ , le joueur de tennis supporte mieux la charge cardiovasculaire imposée lors des échanges et améliore sa récupération entre les points. Alors que la performance dans ce sport est largement dépendante des facteurs techniques, tactiques et de coordination motrice, König et al. (2001) soulignent la nécessité d'avoir une capacité aérobie importante, afin de maintenir ces habiletés pendant plusieurs heures et ainsi reculer l'apparition de la fatigue. Il a également été rapporté que les processus d'adaptation chez les meilleurs tennismen induisent après plusieurs années d'entraînement une augmentation de la taille du myocarde, de la  $\dot{V}O_{2max}$  et une FC inférieure pour une intensité donnée (König et al., 2001). Il existe un consensus dans la littérature selon lequel la pratique seule du tennis n'améliore pas la puissance maximale aérobie du joueur (Groppel & Roetert, 1992; Kraemer et al., 2000). Ainsi, au-delà des méthodes classiques de préparation physique, l'ajout de répétitions de sprints serait un moyen efficace pour améliorer la performance aérobie ( $\dot{V}O_{2max}$ , puissance et vitesse maximales aérobies, performance réalisée sur une distance donnée, activités enzymatiques du métabolisme aérobie) (Helgerud, Engen, Wisloff, & Hoff, 2001; Laursen & Jenkins, 2002) et anaérobie (performances sur un effort bref de sprint, activité enzymatique) (Baquet et al., 2002; Tabata et al., 1996) des athlètes pratiquant une activité intermittente. Alors que dans les sports collectifs, la capacité aérobie des joueurs est significativement influencée par le poste qu'ils occupent (Spencer, Bishop, Dawson, &

Goodman, 2005). Le service médical de l'INSEP a observé que la  $\dot{V}O_{2max}$  est fortement dépendante du type de jeu prédominant de chaque sportif inscrit au pôle France : les joueurs ayant les  $\dot{V}O_{2max}$  les plus élevées sont très nettement les défenseurs, alors que les attaquants ont des valeurs les plus faibles (Jousselin, Desnus, Filliard, Garcia, & Senegas, 2005). En revanche, ces auteurs n'ont pas trouvé de relation significative entre la valeur de  $\dot{V}O_{2max}$  et le classement des joueurs dans leur discipline. Cette étude a aussi mis en évidence des valeurs de  $\dot{V}O_{2max}$  relativement stables au cours de la carrière (plage de mesure : 14 à 32 ans).

Une lecture différente des implications du niveau de  $\dot{V}O_{2max}$  sur la performance a été proposée à travers le suivi d'un joueur allemand de haut niveau (Banzer, Thiel, Rosenhagen, & Vogt, 2008). En effet, le suivi sur 8 années de compétition dans le top 100 ATP a montré que le meilleur classement de fin d'année (6<sup>ème</sup> ATP) a été obtenu à l'issue de la meilleure valeur de  $\dot{V}O_{2max}$  ( $67.4 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) (avec un protocole contraignant : à partir d'une vitesse de  $8.5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , incrémentation de  $1.5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , toutes les 4 minutes). Cette étude confirme que la population du haut niveau est spécifique, et renvoie à des analyses particulières. Par conséquent, le niveau des sujets est primordial dans l'analyse des résultats et dans l'implication des métabolismes aérobie et anaérobie, ne serait-ce que vis-à-vis du format de match des hommes en grand chelem (4 tournois les plus importants de l'année en 3 sets gagnants). En effet, selon Banzer et al. (2008), il y a une très forte corrélation entre le niveau de  $\dot{V}O_{2max}$  et le classement ATP (cf. Figure 17). Il faut malgré tout pondérer la portée de cette étude qui ne concerne qu'un seul joueur avec une API particulière, qui requiert probablement une  $\dot{V}O_{2max}$  importante.



**Figure 17.** Relation  $\dot{V}O_{2\max}$  – Classement ATP (in Banzer et al., 2008)

La capacité à solliciter de façon intermittente les métabolismes anaérobies (pour « faire la différence ») et d'excellentes qualités aérobies pour fournir l'énergie nécessaire aux déplacements et à la récupération, dessinent le profil énergétique du joueur de haut niveau.

Il est possible d'améliorer la capacité à enchaîner des efforts intenses et courts grâce à un bon développement de la capillarisation et de la capacité oxydative des muscles sollicités (Glaister, 2005). Par conséquent, nous pensons qu'un bon équilibre entre la capacité à produire des efforts explosifs et une bonne  $\dot{V}O_{2\max}$  (autour de  $55 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  chez les dames, et  $65 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  chez les hommes), adapté au profil de jeu (cf. notion d'API (Talbot, 1990), caractérise le profil du joueur compétitif moderne.

Une approche « polarisée » de l'entraînement, en intégrant ~ 75% de l'entraînement total qui serait réalisé à faible intensité aérobie (zone 1 :  $\leq SV1, \leq 80\% FC_{\max}, \leq 70\% \dot{V}O_{2\max}$ ), et 10-15% à haute, voire très haute intensité (zone 3 :  $> SV2 (85-90\% h, > 90\% FC_{\max}$ , chez des joueurs de tennis Elite)), a été suggérée pour une distribution optimale des intensités pour les athlètes de haut niveau qui s'expriment dans des activités à hautes intensités (Seiler & Kjerland, 2006). A l'évidence, cette répartition paraît difficilement applicable au tennis compte tenu des habitudes et des bases d'exercices typiques de cette activité mais cette proposition représente une base dans notre démarche. Les effets de l'entraînement sur l'état physiologique général doivent contribuer à équilibrer les influences sur l'activité neurovégétative et l'état général des athlètes. Il s'avère que la plupart des situations d'entraînement qui intègrent de la répétition de

frappe de balle avec de l'engagement mènent les joueurs proches de SV2 (Reid et al., 2008). Par conséquent, nous invitons à reconsidérer des séances à dominante technique mieux « calibrée », avec de l'intensité sur peu de frappes n'excédant pas 7 s, avec 20 s de récupération entre les répétitions, afin de passer plus de temps en zone 1. Cela permettrait de préserver les réserves en hydrates de carbone particulièrement mobilisées à proximité de SV2 (Hollooszy, Kohrt, & Hansen, 1998), ainsi que les réserves glycoéniqes particulièrement dégradées à ces intensités d'après l'analyse de biopsies musculaires sur des cyclistes de haut niveau (Stepsto, Martin, Fallon, & Hawley, 2001). Ce type d'entraînement a également été identifié pour influencer l'état général des athlètes à travers l'analyse de la variabilité cardiaque chez des rameurs de haut niveau (Iellamo et al., 2002). Ces derniers avaient une perte d'énergie parasymphatique compensée partiellement par le système sympathique. Nous pouvons nous appuyer sur l'analyse de l'activité en compétition pour renforcer l'hypothèse que des formes de points joués avec service doivent permettre de maintenir les joueurs proches de la zone 1 ( $\leq$  SV1) avec ses effets moins délétères sur la fatigue (Baiget, Fernandez-Fernandez, Iglesias, & Rodriguez, 2015).

### **Emergence de TEST et de ses applications pratiques**

On note une volonté croissante d'associer des paramètres de la performance technique (précision et/ou vitesse des frappes de balle) aux modifications physiologiques ([La], FC,  $\dot{V}O_2$ ) dans des conditions standardisées (Davey et al., 2002; Smekal et al., 2000; Vergauwen et al., 1998).

En comparant les réponses physiologiques entre une procédure sur le terrain de tennis et un test sur tapis roulant discontinu, Girard et al. (2006) ont souligné que les tests de laboratoire sous-estiment les valeurs de consommation maximale d'oxygène ( $\dot{V}O_{2\max}$ ), tandis que les principales variables cardiorespiratoires (FC,  $\dot{V}O_2$ ) aux intensités sous-maximales ne diffèrent pas. Nous préférons les tests intégrant de réelles frappes de balle car la contribution du haut du corps, qui influence significativement la dépense énergétique (Fernandez-Fernandez et al., 2010), doit être prise en compte. Face à la complexité de la performance et de ses composantes à développer, il apparaît trop fréquemment que les thèmes d'entraînement au tennis soient encore traités de

façon analytique, en dissociant les objectifs techniques et physiques. A travers TEST et ses applications, nous proposons une approche globale afin d'éviter la redondance des sollicitations physiologiques.

TEST constitue un outil d'évaluation spécifique qui permet de combiner une analyse de la performance technique à un niveau d'intensité d'effort d'une part, et de situer le niveau des variables mesurées par rapport aux données déjà publiées d'autre part. De ces analyses on peut déduire les axes de travail techniques et/ou physiologiques prioritaires, ainsi que déterminer un potentiel de performance dans la mesure où les variables ont été traitées pour des hommes et des femmes de haut niveau.

Les performances techniques décroissent à partir de 80%  $\dot{V}O_{2max}$  et sont inversement corrélées à la concentration de lactate chez les hommes (Brechbuhl, Girard, Millet, & Schmitt, 2017), il faut donc considérer des dominantes techniques ou physiques aux séquences programmées en fonction du niveau d'intensité de la situation d'entraînement. Les objectifs à dominante technique seront poursuivis en Zone 1 et 2 ( $\leq SV2$ ) et la dominante énergétique se situera en Zone 3 ( $\geq SV2$ ) (cf. [Figure 14](#) et [tableau 9](#)); ceci toujours en associant une rigueur dans l'exécution des frappes avec des feedbacks sur la vitesse et la précision. Nous tolérerons un écart de 5 % de vitesse en faveur du coup droit car il est couramment observé, et la performance technique semble davantage évoluer à partir des progrès en précision (Brechbuhl et al., 2017). La précision a été identifiée comme un point-clé du niveau en compétition (Smekal et al., 2000). Nos résultats relatifs au tennis féminin soulignent notamment l'importance de la vitesse de balle en revers pour passer d'un niveau international juniors à un niveau professionnel chez les femmes. Alternativement, si on vise la zone 3, on préférera des intervalles de temps allant de 15 s à 1 min entrecoupés par du repos passif (15 à 30 s). Dans tous les cas, on évitera de descendre en dessous de 50% de balles dans la cible définie, pour des joueurs experts, et on tolérera jusqu'à 40% pour des joueurs de niveau moindre (Lyons, Al-Nakeeb, Hankey, & Nevill, 2013) pendant TEST.

Sans condamner la diversité des pratiques (course à pieds, VTT, sports collectifs, etc...), cette démarche pourrait sans doute participer à une meilleure articulation de la programmation des



contenus d'entraînement et de la gestion de la fatigue, en cédant de la place pour des exercices à haute intensité en hypoxie, apparemment beaucoup plus significatifs du point de vue de leurs effets physiologiques.

Notons qu'aucun test d'effort spécifique n'avait encore obtenu une place affirmée au sein d'une fédération de tennis. Ce constat souligne les lacunes encore trop prégnantes des différents tests proposés, soit parce qu'ils ne comportent pas de réelles frappes, soit parce que les conditions de réalisation n'ont pas permis d'obtenir l'intérêt et/ou l'adhésion des entraîneurs. Nous y voyons une opportunité pour créer des liens entre une préparation physique, qui se veut spécifique, et un développement technico-tactique orchestré par les entraîneurs « techniciens ».

### **Vers une optimisation des méthodes d'entraînement à travers l'utilisation de l'hypoxie.**

Dans le sport d'élite, les écarts de performance entre les athlètes sont très minces. Dans un souci d'optimisation de la performance, les athlètes d'endurance recourent de plus en plus aux méthodes d'entraînement impliquant la plus-value apportée par les effets de l'altitude et/ou de l'hypoxie. Le panorama traditionnel de l'entraînement en altitude a récemment été actualisé pour refléter le développement de nouvelles méthodes actuellement utilisées par les sports collectifs. Actuellement, les méthodes « Live low-train high » (LLTH) sont de plus en plus populaires, avec l'apparition encore récente de la « répétition de sprints en hypoxie » (RSH) (Faiss, Girard, & Millet, 2013). Cette méthode diffère du traditionnel « Intermittent Hypoxic Training » (IHT) dans la mesure où l'intensité des efforts doit être maximale, favorisant le recrutement des fibres rapides (Faiss, Leger, et al., 2013). En 2013, en comparant avec un cycle d'entraînement en normoxie (RSN), l'étude pionnière sur RSH a montré des effets plus importants sur la capacité à répéter des sprints et résister à la fatigue (Faiss, Leger, et al., 2013). Avec une si faible « dose hypoxique », il apparaît improbable que la voie erythropoïétique soit stimulée. Plus récemment, une méta-analyse des effets de RSH sur les niveaux de performance au niveau de la mer (Brocherie, Girard, Faiss, & Millet, 2017) indique que cette méthode d'entraînement est efficace pour améliorer les capacités physiques des athlètes, en induisant des gains supérieurs en RSA (habileté à répéter des sprints) lorsqu'ils sont comparés à ceux obtenus avec RSN. Effectivement RSH induit des progrès faibles à modérément supérieurs sur l'habileté

à répéter des sprints, en comparaison avec RSN, sur des populations d'athlète d'endurance ou de sport-collectifs. Les bénéfices observés sur  $\dot{V}O_{2max}$  ne sont pas significativement supérieurs pour RSH vs RSN (Brocherie et al., 2017). En revanche, Goods et al. (2015) ont rapporté des gains en faveur de RSN sur le meilleur sprint de la série de test, ainsi que sur la moyenne obtenue lors de celui-ci ; et une étude montre un gain de  $\dot{V}O_{2max}$  de 8 % chez des cyclistes après un cycle de RSH (Puype et al., 2013). Une autre étude comparant RSH à RSN en double aveugle et « cross-over » n'a pas montré d'effets significatifs en faveur de RSH (Montero & Lundby, 2017). Ils analysaient la capacité à réitérer des sprints, les post-tests ayant été réalisés dans les deux conditions (normoxie et hypoxie). Il apparaît cependant nécessaire de préciser que des progrès significatifs étaient enregistrés dans les deux groupes.

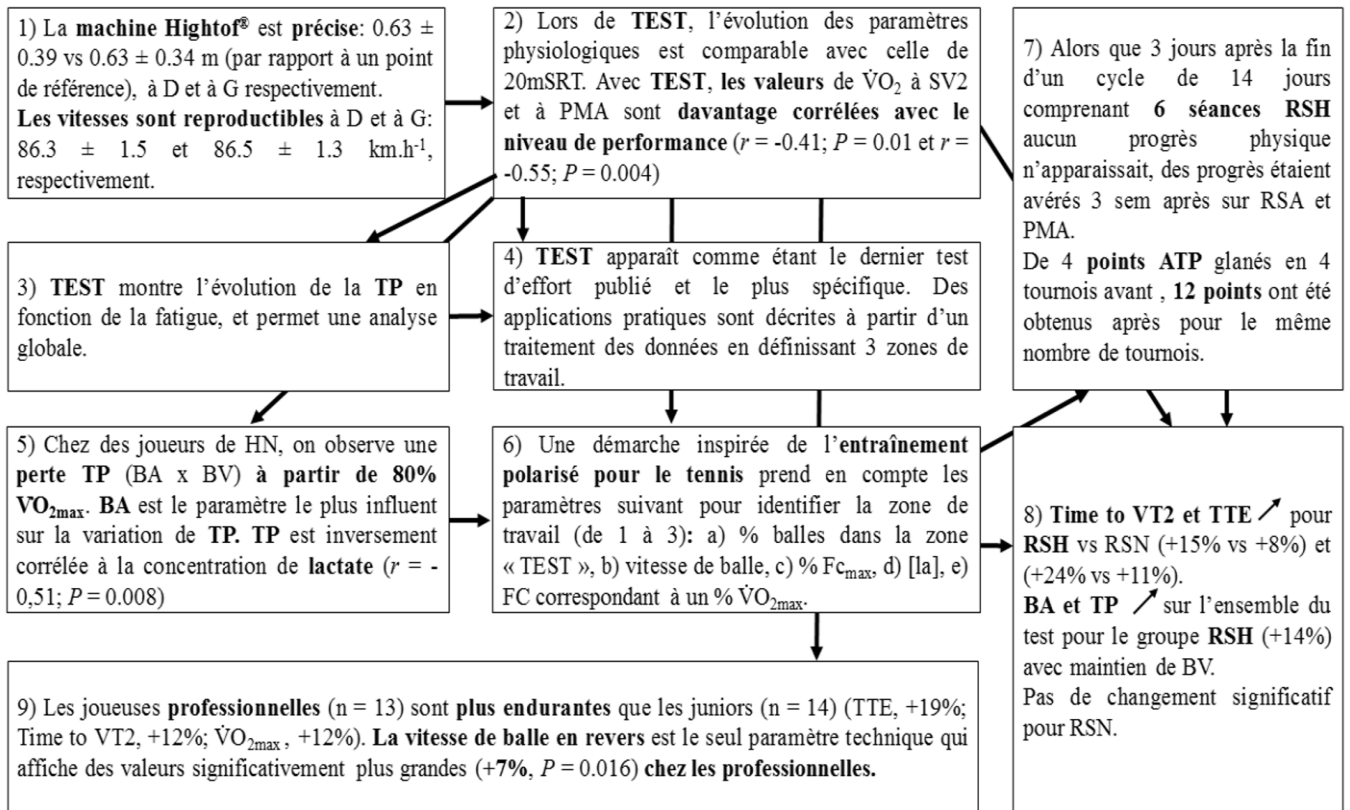
Les recommandations concernant les nouvelles approches d'entraînement en altitude/hypoxie peuvent être formulées ainsi : pour le RSH, 3-4 séries de 4-7 répétitions de sprints à vitesse maximale d'une durée de 5-15 s alternés avec des récupérations passives < 30 s réalisées à ~ 3 000 m. Le choix du mode d'exercice (ergocycle ou tapis roulant) se fera en fonction des spécificités du sport cible et/ ou des effets escomptés. La fatigue neuromusculaire associée aux modalités type « habileté à répéter des sprints » (RSA) est plus grande sur vélo qu'avec la course à pieds (Rampinini et al., 2016). Le modèle RSH semble relativement bien toléré dans la mesure où les réponses perceptuelles (difficulté perçue globalement, aux niveaux respiratoire et musculaire sur les membres inférieurs) sont comparables à celles d'un même entraînement conduit au niveau de la mer dès la deuxième séance d'entraînement (Brocherie, Millet, & Girard, 2017).

Notre étude de cas a montré une amélioration de RSA et de la PMA trois semaines après la fin du protocole d'entraînement qui incluait 6 séances RSH en 14 jours, ainsi que des gains de performance en compétition. Les gains sur le niveau de PMA ont été confirmés lors de notre étude comparative des effets de RSH vs RSN, auxquels s'ajoutent une apparition retardée de SV2 et un gain de performance technique sur l'ensemble de TEST pour le groupe RSH.

L'évolution de la performance technique résulte d'une augmentation de la précision. En revanche nous n'obtenons pas d'effets sur RSA dans cette étude.

Sur la base de l'ensemble des résultats de notre étude comparative de RSH vs RSN, i.e., le groupe RSH ne montrant pas d'amélioration de la  $\dot{V}O_{2max}$  et du RSA, on peut supposer d'autres adaptations pour expliquer les améliorations de la PMA et du temps pour atteindre SV2. On émet l'hypothèse que RSH pourrait favoriser des adaptations positives principalement dues à une augmentation de la perfusion sanguine qui induit une meilleure utilisation de l'oxygène disponible par les fibres rapides (McDonough et al., 2005 ; Cleland et al., 2012). Avec des efforts d'intensité maximale en hypoxie, les adaptations musculaires ont été identifiées au niveau des transporteurs d'oxygène et de lactates, ainsi qu'au niveau de l'activité des enzymes oxydatives telles que la citrate synthase ; ces n'apparaissent pas ou peu en normoxie (Faiss et al., 2013 ; Hoppeler & Vogt, 2001(Vogt et al., 2001; Zoll et al., 2006). L'exercice en hypoxie est également connu pour induire une vasodilatation (ou dilatation des vaisseaux sanguins) compensatoire qui tend à ajuster efficacement l'apport d'O<sub>2</sub> au niveau musculaire (Casey & Joyner, 2012).

Les progrès observés sur la précision des balles produites pourraient s'expliquer par un gain de lucidité que nous ne pouvons pas mettre en évidence par des variables physiologiques. Il a également été montré récemment que l'oxygénation cérébrale s'adapte au stress hypoxique associé à la répétition de sprints sur ergocycle (Curtelin et al., 2017). Il serait par conséquent intéressant de vérifier une éventuelle corrélation entre une amélioration de la précision et une augmentation de l'oxygénation cérébrale.



**Figure 18.** Bilan des résultats et informations les plus significatifs, dans l'ordre des publications, de 1 à 9. ATP, association des joueurs professionnels ; BA, précision (% dans la zone définie) ; BV, vitesse de balle ; D, droite ; G, gauche ; HN, haut niveau ; SV2, 2<sup>ème</sup> seuil ventilatoire ; Time to VT2, délai pour atteindre le 2<sup>ème</sup> seuil ventilatoire ; TP, performance technique ; TTE, total time to exhaustion.

## ***Chapitre 4***

### ***Conclusions et perspectives***

#### 4. Conclusions et Perspectives

TEST a répondu à un ensemble de validation scientifique et de reconnaissance institutionnelle pour ouvrir la voie à de nouvelles applications pratiques en termes d'entraînement. Après avoir validé la précision et la reproductibilité de la machine, nous avons démontré la fiabilité du protocole de TEST dans une démarche « académique ». A partir de cet acquis, nous avons utilisé les données recueillies afin de mieux comprendre les comportements techniques des athlètes en fonction de la difficulté de l'effort avant de proposer des applications construites à partir de TEST. Ces apports ont été notamment publiés dans une revue indexée soumise à comité de lecture, plus ciblée spécifiquement vers le monde du tennis malgré une présence dans plusieurs bases de données.

Au-delà de l'entraînement, TEST constitue un outil d'évaluation intéressant pour estimer les effets de nouvelles modalités d'entraînement de par ses frappes intégrées, le temps raisonnable pour le réaliser, ainsi que l'assurance d'obtenir une PMA exprimée en fréquence de balles maximale aérobie (MAF). A partir de TEST et de l'analyse des données que nous avons réalisée, nous pouvons utiliser les données techniques (i.e., vitesse de balle et % de précision) et physiologiques (e.g., FC correspondant à SV1 et SV2,  $FC_{max}$ , intensité correspondant à  $[La] = 2$  et  $4 \text{ mmol.L}^{-1}$ , valeurs de MAF et de  $\dot{V}O_{2max}$ ) comme repères pour l'entraînement, mais également comme repères pour situer le niveau des ressources des joueurs en les comparant aux données publiées. Nous ne considérons pas la machine lance balles comme unique moyen d'entraînement, il faut conserver tous les apports relatifs à la confrontation avec un adversaire. Les valeurs techniques et physiologiques restent utilisables dans toutes les situations.

D'un point de vue pratique, nos résultats soulignent l'intérêt de pratiquer un cycle de minimum 5 à 6 séances RSH dans une période de 12 à 14 jours en cours de saison. Chaque séance doit comprendre 4 séries de 5 répétitions de 6 s d'effort environ, avec un départ toutes les 30 s. Un repos de 5 min est à observer entre les séries. La méthode RSH peut être réalisée à partir des nouvelles technologies dédiées aux salles hypoxiques (e.g., chambre hypoxique normobarique qui réduit le contenu d'oxygène inspiré soit par dilution d'hydrogène, soit par filtration de l'oxygène). Dans une méta-analyse récente, l'altitude moyenne simulée utilisée dans les études

RSH étaient comprises entre 2900 et 3500 m (Brocherie et al., 2017). Etant donné que « plus haut ne signifie pas plus efficace » d'après les résultats obtenus suite à un entraînement à une altitude de 4000 m simulée, il est recommandé de s'entraîner à une altitude d'environ 3000 m pour la mise en œuvre de la méthode RSH (Goods et al., 2014).

On souhaite dissuader les athlètes de porter un « Elevation Training Mask » pour s'entraîner en hypoxie compte tenu d'une publication récente (Porcari et al., 2016). Cela ne simule pas l'altitude comme les chambres hypoxiques normobariques et/ou l'altitude réelle (hypoxie hypobarique) qui pourrait également être utilisée, même si aucune recherche n'a encore comparée RSH "normobarique" vs "hypobarique". Cependant les réponses physiologiques (saturation en oxygène et FC) sont plus aigües en hypoxie hypobarique (Millet, Faiss, & Pialoux, 2012). Cela pourrait induire des altérations de la performance lors d'entraînement en altitude réelle. Par conséquent une altitude réelle comprise entre 2000 m et 2500 m serait probablement adapté pour optimiser les effets de RSH.

Les résultats obtenus lors de nos études sur les effets de RSH nous encouragent à mieux comprendre les mécanismes sous-jacents à une meilleure performance en compétition à la suite d'un protocole RSH, ainsi qu'un niveau de précision accru face à l'apparition de la fatigue inhérente à la pratique d'un test d'effort. L'évolution de nos installations a également répondu à notre souhait de faire évoluer notre nouvelle technique d'entraînement vers encore plus de spécificité, en intégrant des frappes de balles. Cette orientation répond également aux travaux de Faiss et al. (2015) qui montrent une efficacité supérieure de RSH pour les modalités d'entraînement impliquant les membres supérieurs. Ces résultats pourraient s'expliquer par une proportion plus importante de fibres rapides dans les membres supérieurs (Klein, Marsh, Petrella, & Rice, 2003).

A ce jour, on sait que RSA sur vélo (en normoxie) est altérée en fonction de la diminution de l'oxygénation cérébrale (Smith & Billaut, 2010). Galvin et al. (2013) ont déjà émis l'hypothèse que l'amélioration de performance de leur groupe hypoxie était probablement la conséquence d'une plus faible désoxygénation cérébrale, en s'appuyant sur les résultats d'une

étude mettant en lien la désoxygénation cérébrale avec la fatigue centrale (Goodall, Gonzalez-Alonso, Ali, Ross, & Romer, 2012). L'optimisation de l'oxygénation cérébrale après RSH favoriserait donc le maintien du système nerveux central et contribuerait à une amélioration de la capacité de travail. Spécifiquement, lors d'un exercice type RS, une perte d'oxygénation cérébrale est associée à une perte de capacité physique (Billaut & Smith, 2010; Smith & Billaut, 2012).

Les résultats obtenus lors de nos études nous encouragent à mieux comprendre les mécanismes sous-jacents à une meilleure performance en compétition à la suite d'un protocole RSH, ainsi qu'un niveau de précision accru face à l'apparition de la fatigue inhérente à la pratique d'un test d'effort. Dans ce sens, il apparaît intéressant d'envisager les effets d'un cycle RSH sur la mesure du flux sanguin cérébral à l'aide de la NIRS (Portalite; Artinis, Zetten, The Netherlands) comme Curtelin et al. (2018) l'ont réalisé sur ergocycle en situation d'entraînement en hypoxie. Les réponses de l'entraînement en altitude sont complexes parce que le stress hypoxique est combiné à celui de l'entraînement (Schmitt, Hellard, et al., 2006). L'hypoxie représente un facteur de stress supplémentaire avec la réduction de la  $PIO_2$  (pression partielle de l'oxygène inspiré) et une diminution transitoire des activités parasympathiques et nerveuses sympathiques (Kanai et al., 2001; Perini & Veicsteinas, 2003; Sevre et al., 2001). A ce jour aucune publication ne concerne l'effet de RSH sur l'activité neurovégétative.

Nous venons de finir un nouveau protocole inspiré de nos résultats qui viendra potentiellement éclairer ceux que nous avons déjà obtenus dans l'activité spécifique. Afin de pouvoir aller plus loin dans l'analyse et l'interprétation des résultats, nous avons notamment inclus les mesures relatives à l'oxygénation cérébrale qui s'imposaient. L'objectif de cette étude est d'analyser l'efficacité de la méthode de répétition de sprints en hypoxie (RSH) sur les performances spécifiques tennis et les ressources physiologiques mobilisées. Nous chercherons à identifier si les résultats peuvent être mis en relation avec d'éventuelles modifications de perfusion sanguine musculaire et cérébrale. Il a déjà été montré une amélioration de la perfusion sanguine au niveau musculaire (Faiss et al., 2015) et cérébral (Galvin et al. 2013), suite à un cycle d'entraînement sous la forme RSH. Notre objectif principal sera d'analyser si l'amélioration de la perfusion



sanguine au niveau musculaire et cérébral est corrélée aux gains techniques et physiologiques mesurés lors du test spécifique tennis, ainsi que lors d'un test RSA plus spécifique au sport concerné. Un objectif secondaire consistera à déterminer si une élévation de l'activité nerveuse sympathique intervient à partir de l'analyse de la variabilité cardiaque.

Une prochaine étape pourra consister à évaluer les effets d'un cycle d'entraînement se rapprochant des préceptes de l'entraînement polarisé. L'entraînement polarisé adapté au tennis correspondrait plutôt à 55 % temps en zone 1, 30% en zone 2, et 15% en zone 3. Il s'agira de combiner des séances « calibrées » avec la machine Hightof<sup>®</sup>, des séquences technico-tactiques avec suivi de la FC, des séquences de renforcement musculaire déjà intégrées dans les pratiques, ainsi que des séances RSH. Nous pourrions procéder de la même manière que pour la validation de RSH pour les joueurs de tennis, i.e., une étude de cas avec un athlète de haut niveau en pleine activité sur le circuit professionnel suivie d'une expérimentation élargie à une population bien entraînée.

*« Que la force me soit donnée de supporter ce qui ne peut être changé et le courage de changer ce qui peut l'être, mais aussi la sagesse de distinguer l'un de l'autre ». (Marc-Aurèle)*

## ***Chapitre 5***

### ***Références***

## 5- Références

- ACM'S. (2006). *American College of Sports Medicine's guidelines for exercise testing and prescription*. Philadelphia, PA.
- Amann, M., Subudhi, A., & Foster, C. (2004). Influence of testing protocol on ventilatory thresholds and cycling performance. *Med Sci Sports Exerc*, 36(4), 613-622.
- Astorino, T. A., Robergs, R. A., Ghiasvand, F., Marks, D., & Burns, S. (2000). Incidence of the oxygen plateau at VO<sub>2</sub>max during exercise testing to volitional fatigue. *J Exerc Physiol Online*, 3(4), 12.
- Baiget, E., Fernandez-Fernandez, J., Iglesias, X., & Rodriguez, F. A. (2015). Tennis Play Intensity Distribution and Relation with Aerobic Fitness in Competitive Players. *PLoS One*, 10(6), e0131304. doi:10.1371/journal.pone.0131304
- Baiget, E., Fernandez-Fernandez, J., Iglesias, X., Vallejo, L., & Rodriguez, F. A. (2014). On-court endurance and performance testing in competitive male tennis players. *J Strength Cond Res*, 28(1), 256-264. doi:10.1519/JSC.0b013e3182955dad
- Baiget, E., Iglesias, X., & Rodriguez, F. A. (2017). Maximal Aerobic Frequency of Ball Hitting: A New Training Load Parameter in Tennis. *J Strength Cond Res*, 31(1), 106-114. doi:10.1519/JSC.0000000000001480
- Balmer, J., Davison, R. C., & Bird, S. R. (2000). Reliability of an air-braked ergometer to record peak power during a maximal cycling test. *Med Sci Sports Exerc*, 32(10), 1790-1793.
- Bangsbo, J., Iaia, F. M., & Krstrup, P. (2008). The Yo-Yo intermittent recovery test : a useful tool for evaluation of physical performance in intermittent sports. *Sports Med*, 38(1), 37-51.
- Banzer, W., Thiel, C., Rosenhagen, A., & Vogt, L. (2008). Tennis ranking related to exercise capacity. *Br J Sports Med*, 42(2), 152-154; discussion 154. doi:10.1136/bjism.2007.036798
- Baquet, G., Berthoin, S., Dupont, G., Blondel, N., Fabre, C., & van Praagh, E. (2002). Effects of high intensity intermittent training on peak VO<sub>2</sub> in prepubertal children. *Int J Sports Med*, 23(6), 439-444. doi:10.1055/s-2002-33742
- Bekraoui, N., Fargeas-Gluck, M. A., & Leger, L. (2012). Oxygen uptake and heart rate response of 6 standardized tennis drills. *Appl Physiol Nutr Metab*, 37(5), 982-989. doi:10.1139/h2012-082
- Bentley, D. J., & McNaughton, L. R. (2003). Comparison of W(peak), VO<sub>2</sub>(peak) and the ventilation threshold from two different incremental exercise tests: relationship to endurance performance. *J Sci Med Sport*, 6(4), 422-435.
- Bentley, D. J., Newell, J., & Bishop, D. (2007). Incremental exercise test design and analysis: implications for performance diagnostics in endurance athletes. *Sports Med*, 37(7), 575-586.
- Bentley, D. J., Wilson, G. J., Davie, A. J., & Zhou, S. (1998). Correlations between peak power output, muscular strength and cycle time trial performance in triathletes. *J Sports Med Phys Fitness*, 38(3), 201-207.
- Bergeron, M. F., Maresh, C. M., Kraemer, W. J., Abraham, A., Conroy, B., & Gabaree, C. (1991). Tennis: a physiological profile during match play. *Int J Sports Med*, 12(5), 474-479. doi:10.1055/s-2007-1024716
- Bernardi M, D. V. G., Falvo ME, Marino S, et Montellanico F (1998). Cardiorespiratory adjustment in middle-level tennis players : are long term cardiovascular adjustments possible ? . In M. I. W. (Lees A., Hughes M., et Reilly T. Eds) (Ed.), *Science et racket sports II* (pp. 20-26): E & FN Spon, London.
- Billaut, F., & Smith, K. (2010). Prolonged repeated-sprint ability is related to arterial O<sub>2</sub> desaturation in men. *Int J Sports Physiol Perform*, 5(2), 197-209.
- Bishop, D., Jenkins, D. G., & Mackinnon, L. T. (1998). The effect of stage duration on the calculation of peak VO<sub>2</sub> during cycle ergometry. *J Sci Med Sport*, 1(3), 171-178.
- Bishop, D., Jenkins, D. G., McEniery, M., & Carey, M. F. (2000). Relationship between plasma lactate parameters and muscle characteristics in female cyclists. *Med Sci Sports Exerc*, 32(6), 1088-1093.

- Bowtell, J. L., Cooke, K., Turner, R., Mileva, K. N., & Sumners, D. P. (2014). Acute physiological and performance responses to repeated sprints in varying degrees of hypoxia. *J Sci Med Sport*, 17(4), 399-403. doi:10.1016/j.jsams.2013.05.016
- Brechbuhl, C., Girard, O., Millet, G. P., & Schmitt, L. (2016). On the Use of a Test to Exhaustion Specific to Tennis (TEST) with Ball Hitting by Elite Players. *PLoS One*, 11(4), e0152389. doi:10.1371/journal.pone.0152389
- Brechbuhl, C., Girard, O., Millet, G. P., & Schmitt, L. (2016). Stress test specific to tennis. *Coaching and Sport Science Review*(70), 26-29.
- Brechbuhl, C., Girard, O., Millet, G. P., & Schmitt, L. (2017). Technical Alterations during an Incremental Field Test in Elite Male Tennis Players. *Med Sci Sports Exerc*, 49(9), 1917-1926. doi:10.1249/MSS.0000000000001303
- Brechbuhl, C., Girard, O., Millet, G. P., & Schmitt, L. (2017). Towards polarized training in tennis? Usefulness of combining technical and physiological assessments during a new incremental field test. *Coaching and Sport Science Review*(73), 18-21.
- Brechbuhl, C., Millet, G., & Schmitt, L. (2016). Accuracy and Reliability of a New Tennis Ball Machine. *J Sports Sci Med*, 15(2), 263-267.
- Brocherie, F., Girard, O., Faiss, R., & Millet, G. P. (2015). High-intensity intermittent training in hypoxia: a double-blinded, placebo-controlled field study in youth football players. *J Strength Cond Res*, 29(1), 226-237. doi:10.1519/JSC.0000000000000590
- Brocherie, F., Girard, O., Faiss, R., & Millet, G. P. (2017b). Effects of Repeated-Sprint Training in Hypoxia on Sea-Level Performance: A Meta-Analysis. *Sports Med*, 47(8), 1651-1660. doi:10.1007/s40279-017-0685-3
- Brocherie, F., Millet, G. P., & Girard, O. (2017). Psychophysiological Responses to Repeated-Sprint Training in Normobaric Hypoxia and Normoxia. *Int J Sports Physiol Perform*, 12(1), 115-123. doi:10.1123/ijsp.2016-0052
- Brocherie, F., Millet, G. P., Hauser, A., Steiner, T., Rysman, J., Wehrin, J. P., & Girard, O. (2015). "Live High-Train Low and High" Hypoxic Training Improves Team-Sport Performance. *Med Sci Sports Exerc*, 47(10), 2140-2149. doi:10.1249/MSS.0000000000000630
- Brown, E., & O'Donoghue, P. (2008). Gender and surface effect on elite tennis strategy. *ITF Coach Sport Sci Rev*, 46(12), 9-1.
- Brue, F. (1985). *Une variante du test progressif et maximal de Léger-Boucher: le test de VMA derrière cycliste*. Paper presented at the Colloque médico-technique de la Fédération Française d'Athlétisme.
- Buchfuhrer, M. J., Hansen, J. E., Robinson, T. E., Sue, D. Y., Wasserman, K., & Whipp, B. J. (1983). Optimizing the exercise protocol for cardiopulmonary assessment. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 55(5), 1558-1564. doi:10.1152/jappl.1983.55.5.1558
- Buchheit, M. (2008). The 30-15 intermittent fitness test: accuracy for individualizing interval training of young intermittent sport players. *J Strength Cond Res*, 22(2), 365-374. doi:10.1519/JSC.0b013e3181635b2e
- Buchheit, M., Mendez-Villanueva, A., Delhomel, G., Brughelli, M., & Ahmaidi, S. (2010). Improving repeated sprint ability in young elite soccer players: repeated shuttle sprints vs. explosive strength training. *J Strength Cond Res*, 24(10), 2715-2722. doi:10.1519/JSC.0b013e3181bf0223
- Buchheit, M., Mendez-Villanueva, A., Quod, M., Quesnel, T., & Ahmaidi, S. (2010). Improving acceleration and repeated sprint ability in well-trained adolescent handball players: speed versus sprint interval training. *Int J Sports Physiol Perform*, 5(2), 152-164.
- Casey, D. P., & Joyner, M. J. (2012). Compensatory vasodilatation during hypoxic exercise: mechanisms responsible for matching oxygen supply to demand. *J Physiol*, 590(24), 6321-6326. doi:10.1113/jphysiol.2012.242396
- Christmass, M. A., Richmond, S. E., Cable, N. T., Arthur, P. G., & Hartmann, P. E. (1998). Exercise intensity and metabolic response in singles tennis. *J Sports Sci*, 16(8), 739-747. doi:10.1080/026404198366371

- Cleland, S. M., Murias, J. M., Kowalchuk, J. M., & Paterson, D. H. (2012). Effects of prior heavy-intensity exercise on oxygen uptake and muscle deoxygenation kinetics of a subsequent heavy-intensity cycling and knee-extension exercise. *Appl Physiol Nutr Metab*, 37(1), 138-148. doi:10.1139/h11-143
- Cooke, K., & Davey, P. R. (2005). Tennis ball diameter: the effect on performance and the concurrent physiological responses. *J Sports Sci*, 23(1), 31-39. doi:10.1080/02640410410001730052
- Curtelin, D., Morales-Alamo, D., Torres-Peralta, R., Rasmussen, P., Martin-Rincon, M., Perez-Valera, M., . . . Calbet, J. A. (2017). Cerebral blood flow, frontal lobe oxygenation and intra-arterial blood pressure during sprint exercise in normoxia and severe acute hypoxia in humans. *J Cereb Blood Flow Metab*, 271678X17691986. doi:10.1177/0271678X17691986
- Curtelin, D., Morales-Alamo, D., Torres-Peralta, R., Rasmussen, P., Martin-Rincon, M., Perez-Valera, M., . . . Calbet, J. A. (2018). Cerebral blood flow, frontal lobe oxygenation and intra-arterial blood pressure during sprint exercise in normoxia and severe acute hypoxia in humans. *J Cereb Blood Flow Metab*, 38(1), 136-150. doi:10.1177/0271678X17691986
- Dansou, P., Oddou, M., Delaire, M., & Therminarias, A. (2001). Dépense énergétique au cours d'un match de tennis, du laboratoire au terrain. *Sci & Sports*(16), 16-22.
- Davey, P. R., Thorpe, R. D., & Williams, C. (2002). Fatigue decreases skilled tennis performance. *J Sports Sci*, 20(4), 311-318. doi:10.1080/026404102753576080
- Deutsch, E., Deutsch, S. L., & Douglas, P. S. (1988). Exercise training for competitive tennis. *Clin Sports Med*, 7(2), 417-427.
- Dill, D. B., & Adams, W. C. (1971). Maximal oxygen uptake at sea level and at 3,090-m altitude in high school champion runners. *J Appl Physiol*, 30(6), 854-859. doi:10.1152/jappl.1971.30.6.854
- Dupuy, O., Breque, C., Fargeas-Gluck, M. A., & Valle, V. (2012). *Expertise des exigences du tennis de haut niveau.*, Paris Roland Garros.
- Dupuy, O., & Fargeas-Gluck, M. A. (2007). Actualisation des temps de jeu. *la lettre du club fédéral des enseignants professionnels*(46).
- Faiss, R., Girard, O., & Millet, G. P. (2013). Advancing hypoxic training in team sports: from intermittent hypoxic training to repeated sprint training in hypoxia. *Br J Sports Med*, 47 Suppl 1, i45-50. doi:10.1136/bjsports-2013-092741
- Faiss, R., Leger, B., Vesin, J. M., Fournier, P. E., Eggel, Y., Deriaz, O., & Millet, G. P. (2013). Significant molecular and systemic adaptations after repeated sprint training in hypoxia. *PLoS One*, 8(2), e56522. doi:10.1371/journal.pone.0056522
- Faiss, R., Willis, S., Born, D. P., Sperlich, B., Vesin, J. M., Holmberg, H. C., & Millet, G. P. (2015). Repeated double-poling sprint training in hypoxia by competitive cross-country skiers. *Med Sci Sports Exerc*, 47(4), 809-817. doi:10.1249/MSS.0000000000000464
- Fargeas-Gluck, M. A., & Leger, L. A. (2012). Comparison of two aerobic field tests in young tennis players. *J Strength Cond Res*, 26(11), 3036-3042. doi:10.1519/JSC.0b013e3182472fc3
- Fernandez-Fernandez, J., Sanz-Rivas, D., Kovacs, M. S., & Moya, M. (2015). In-season effect of a combined repeated sprint and explosive strength training program on elite junior tennis players. *J Strength Cond Res*, 29(2), 351-357. doi:10.1519/JSC.0000000000000759
- Fernandez-Fernandez, J., Kinner, V., & Ferrauti, A. (2010). The physiological demands of hitting and running in tennis on different surfaces. *J Strength Cond Res*, 24(12), 3255-3264. doi:10.1519/JSC.0b013e3181e8745f
- Fernandez-Fernandez, J., Mendez-Villanueva, A., Fernandez-Garcia, B., & Terrados, N. (2007). Match activity and physiological responses during a junior female singles tennis tournament. *Br J Sports Med*, 41(11), 711-716. doi:10.1136/bjism.2007.036210
- Fernandez-Fernandez, J., Sanz-Rivas, D., Fernandez-Garcia, B., & Mendez-Villanueva, A. (2008). Match activity and physiological load during a clay-court tennis tournament in elite female players. *J Sports Sci*, 26(14), 1589-1595. doi:10.1080/02640410802287089

- Fernandez-Fernandez, J., Ulbricht, A., & Ferrauti, A. (2014). Fitness testing of tennis players: how valuable is it? *Br J Sports Med*, *48 Suppl 1*, i22-31. doi:10.1136/bjsports-2013-093152
- Fernandez-Fernandez, J., Zimek, R., Wiewelhove, T., & Ferrauti, A. (2012). High-intensity interval training vs. repeated-sprint training in tennis. *J Strength Cond Res*, *26*(1), 53-62. doi:10.1519/JSC.0b013e318220b4ff
- Fernandez, J., Mendez-Villanueva, A., & Pluim, B. M. (2006). Intensity of tennis match play. *Br J Sports Med*, *40*(5), 387-391; discussion 391. doi:10.1136/bjism.2005.023168
- Ferrauti, A., Bergeron, M. F., Pluim, B. M., & Weber, K. (2001). Physiological responses in tennis and running with similar oxygen uptake. *Eur J Appl Physiol*, *85*(1-2), 27-33. doi:10.1007/s004210100425
- Ferrauti, A., Kinner, V., & Fernandez-Fernandez, J. (2011). The Hit & Turn Tennis Test: an acoustically controlled endurance test for tennis players. *J Sports Sci*, *29*(5), 485-494. doi:10.1080/02640414.2010.539247
- Ferrauti, A., Pluim, B. M., Busch, T., & Weber, K. (2003). Blood glucose responses and incidence of hypoglycaemia in elite tennis under practice and tournament conditions. *J Sci Med Sport*, *6*(1), 28-39.
- Ferrauti, A., Weber, K., & Wright, P. (2003). Endurance: Basic, semi-specific and specific. In Q. A. Reid M, and Crespo M (Ed.), *Strength and Conditioning for Tennis*. London, United Kingdom: ITF Ltd.
- Friedmann, B., Kinscherf, R., Borisch, S., Richter, G., Bartsch, P., & Billeter, R. (2003). Effects of low-resistance/high-repetition strength training in hypoxia on muscle structure and gene expression. *Pflugers Arch*, *446*(6), 742-751. doi:10.1007/s00424-003-1133-9
- Galvin, H. M., Cooke, K., Sumners, D. P., Mileva, K. N., & Bowtell, J. L. (2013). Repeated sprint training in normobaric hypoxia. *Br J Sports Med*, *47 Suppl 1*, i74-79. doi:10.1136/bjsports-2013-092826
- Gatterer, H., Philippe, M., Menz, V., Mosbach, F., Faulhaber, M., & Burtscher, M. (2014). Shuttle-run sprint training in hypoxia for youth elite soccer players: a pilot study. *J Sports Sci Med*, *13*(4), 731-735.
- Girard, O. (2006). *Fatigue neuromusculaire et altérations mécaniques dans les activités intermittentes: applications aux sports de raquet*. (Ph D), Montpellier 1, Montpellier.
- Girard, O., Amann, M., Aughey, R., Billaut, F., Bishop, D. J., Bourdon, P., . . . Schumacher, Y. O. (2013). Position statement--altitude training for improving team-sport players' performance: current knowledge and unresolved issues. *Br J Sports Med*, *47 Suppl 1*, i8-16. doi:10.1136/bjsports-2013-093109
- Girard, O., Mendez-Villanueva, A., & Bishop, D. (2011). Repeated-sprint ability - part I: factors contributing to fatigue. *Sports Med*, *41*(8), 673-694. doi:10.2165/11590550-000000000-00000
- Girard, O., Brocherie, F., & Millet, G. P. (2017). Effects of Altitude/Hypoxia on Single- and Multiple-Sprint Performance: A Comprehensive Review. *Sports Med*, *47*(10), 1931-1949. doi:10.1007/s40279-017-0733-z
- Girard, O., Chevalier, R., Leveque, F., Micallef, J. P., & Millet, G. P. (2006). Specific incremental field test for aerobic fitness in tennis. *Br J Sports Med*, *40*(9), 791-796. doi:10.1136/bjism.2006.027680
- Glaister, M. (2005). Multiple sprint work : physiological responses, mechanisms of fatigue and the influence of aerobic fitness. *Sports Med*, *35*(9), 757-777.
- Goodall, S., Gonzalez-Alonso, J., Ali, L., Ross, E. Z., & Romer, L. M. (2012). Supraspinal fatigue after normoxic and hypoxic exercise in humans. *J Physiol*, *590*(11), 2767-2782. doi:10.1113/jphysiol.2012.228890
- Goods, P. S., Dawson, B., Landers, G. J., Gore, C. J., & Peeling, P. (2015). No Additional Benefit of Repeat-Sprint Training in Hypoxia than in Normoxia on Sea-Level Repeat-Sprint Ability. *J Sports Sci Med*, *14*(3), 681-688.
- Goods, P. S., Dawson, B. T., Landers, G. J., Gore, C. J., & Peeling, P. (2014). Effect of different simulated altitudes on repeat-sprint performance in team-sport athletes. *Int J Sports Physiol Perform*, *9*(5), 857-862. doi:10.1123/ijsp.2013-0423

- Gore, C. J., Clark, S. A., & Saunders, P. U. (2007). Nonhematological mechanisms of improved sea-level performance after hypoxic exposure. *Med Sci Sports Exerc*, 39(9), 1600-1609. doi:10.1249/mss.0b013e3180de49d3
- Groppe, J. L., & Roetert, E. P. (1992). Applied physiology of tennis. *Sports Med*, 14(4), 260-268.
- Helgerud, J., Engen, L. C., Wisloff, U., & Hoff, J. (2001). Aerobic endurance training improves soccer performance. *Med Sci Sports Exerc*, 33(11), 1925-1931.
- Helsen, W., & Bultynck, J. B. (2004). Physical and perceptual-cognitive demands of top-class refereeing in association football. *J Sports Sci*, 22(2), 179-189. doi:10.1080/02640410310001641502
- Holloszy, J. O., Kohrt, W. M., & Hansen, P. A. (1998). The regulation of carbohydrate and fat metabolism during and after exercise. *Front Biosci*, 3, D1011-1027.
- Hoppeler, H., & Vogt, M. (2001). Muscle tissue adaptations to hypoxia. *J Exp Biol*, 204(Pt 18), 3133-3139.
- Iellamo, F., Legramante, J. M., Pigozzi, F., Spataro, A., Norbiato, G., Lucini, D., & Pagani, M. (2002). Conversion from vagal to sympathetic predominance with strenuous training in high-performance world class athletes. *Circulation*, 105(23), 2719-2724.
- ITF. (2007). Approved Tennis Balls and Classified Court Surfaces. *ITF*.
- Jones, B., Hamilton, D. K., & Cooper, C. E. (2015). Muscle oxygen changes following Sprint Interval Cycling training in elite field hockey players. *PLoS One*, 10(3), e0120338. doi:10.1371/journal.pone.0120338.
- Jousselin, E., Desnus, B., Filliard, J., Garcia, J., & Senegas, X. (2005). Intérêt des épreuves d'effort énergétique dans les sports de raquette. In D. Lehenaff, Kahn, J.F. (Ed.), *Les sports de raquette* (pp. 129-142). Paris: INSEP.
- Kanai, M., Nishihara, F., Shiga, T., Shimada, H., & Saito, S. (2001). Alterations in autonomic nervous control of heart rate among tourists at 2700 and 3700 m above sea level. *Wilderness Environ Med*, 12(1), 8-12.
- Klein, C. S., Marsh, G. D., Petrella, R. J., & Rice, C. L. (2003). Muscle fiber number in the biceps brachii muscle of young and old men. *Muscle Nerve*, 28(1), 62-68. doi:10.1002/mus.10386
- Konig, D., Huonker, M., Schmid, A., Halle, M., Berg, A., & Keul, J. (2001). Cardiovascular, metabolic, and hormonal parameters in professional tennis players. *Med Sci Sports Exerc*, 33(4), 654-658.
- Kovacs, M. S. (2006). Applied physiology of tennis performance. *Br J Sports Med*, 40(5), 381-385; discussion 386. doi:10.1136/bjsm.2005.023309
- Kovacs, M. S. (2007). Tennis physiology: training the competitive athlete. *Sports Med*, 37(3), 189-198.
- Kowalchuk, J. M., Rossiter, H. B., Ward, S. A., & Whipp, B. J. (2002). The effect of resistive breathing on leg muscle oxygenation using near-infrared spectroscopy during exercise in men. *Exp Physiol*, 87(5), 601-611
- Kraemer, W. J., Ratamess, N., Fry, A. C., Triplett-McBride, T., Koziris, L. P., Bauer, J. A., . . . Fleck, S. J. (2000). Influence of resistance training volume and periodization on physiological and performance adaptations in collegiate women tennis players. *Am J Sports Med*, 28(5), 626-633. doi:10.1177/03635465000280050201
- Krustrup, P., Mohr, M., Steensberg, A., Bencke, J., Kjaer, M., & Bangsbo, J. (2006). Muscle and blood metabolites during a soccer game: implications for sprint performance. *Med Sci Sports Exerc*, 38(6), 1165-1174. doi:10.1249/01.mss.0000222845.89262.cd
- Landlinger, J., Stöggl, T., Lindinger, S., Wagner, H., & Müller, E. (2012). Differences in ball speed and accuracy of tennis groundstrokes between elite and high-performance players. *European Journal of Sport Science*, 12(4), 301-308. doi:Org/10.1080/17461391.2011.566363
- Laursen, P. B., & Jenkins, D. G. (2002). The scientific basis for high-intensity interval training: optimising training programmes and maximising performance in highly trained endurance athletes. *Sports Med*, 32(1), 53-73.

- Lees, A. (2003). Science and the major racket sports: a review. *J Sports Sci*, 21(9), 707-732. doi:10.1080/0264041031000140275
- Leger, L., & Boucher, R. (1980). An indirect continuous running multistage field test: the Universite de Montreal track test. *Can J Appl Sport Sci*, 5(2), 77-84.
- Leger, L. A., & Lambert, J. (1982). A maximal multistage 20-m shuttle run test to predict VO<sub>2</sub> max. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 49(1), 1-12.
- Levine, B. D., & Stray-Gundersen, J. (1997). "Living high-training low": effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *J Appl Physiol* (1985), 83(1), 102-112. doi:10.1152/jappl.1997.83.1.102
- Lucia, A., Pardo, J., Durantez, A., Hoyos, J., & Chicharro, J. L. (1998). Physiological differences between professional and elite road cyclists. *Int J Sports Med*, 19(5), 342-348.
- Lyons, M., Al-Nakeeb, Y., Hankey, J., & Nevill, A. (2013). The effect of moderate and high-intensity fatigue on groundstroke accuracy in expert and non-expert tennis players. *J Sports Sci Med*, 12(2), 298-308.
- McCarthy-Davey, P. R. (2000). Fatigue, carbohydrate supplementation and skilled tennis performance. In C. A. Haake S (Ed.), *Tennis Sciences and Technology* (pp. 333-340). Oxford: Blackwell.
- McDonough, P., Behnke, B. J., Padilla, D. J., Musch, T. I., & Poole, D. C. (2005). Control of microvascular oxygen pressures in rat muscles comprised of different fibre types. *J Physiol*, 563(Pt 3), 903-913. doi:10.1113/jphysiol.2004.079533
- McNaughton, L. R., Roberts, S., & Bentley, D. J. (2006). The relationship among peak power output, lactate threshold, and short-distance cycling performance: effects of incremental exercise test design. *J Strength Cond Res*, 20(1), 157-161. doi:10.1519/R-15914.1
- Mendez-Villanueva, A., Edge, J., Suriano, R., Hamer, P., & Bishop, D. (2012). The recovery of repeated-sprint exercise is associated with PCr resynthesis, while muscle pH and EMG amplitude remain depressed. *PLoS One*, 7(12), e51977. doi:10.1371/journal.pone.0051977
- Mendez-Villanueva, A., Fernandez-Fernandez, J., Bishop, D., & Fernandez-Garcia, B. (2010). Ratings of perceived exertion-lactate association during actual singles tennis match play. *J Strength Cond Res*, 24(1), 165-170. doi:10.1519/JSC.0b013e3181a5bc6d
- Mendez-Villanueva, A., Fernandez-Fernandez, J., Bishop, D., Fernandez-Garcia, B., & Terrados, N. (2007). Activity patterns, blood lactate concentrations and ratings of perceived exertion during a professional singles tennis tournament. *Br J Sports Med*, 41(5), 296-300; discussion 300. doi:10.1136/bjism.2006.030536
- Midgley, A. W., Bentley, D. J., Luttikholt, H., McNaughton, L. R., & Millet, G. P. (2008). Challenging a dogma of exercise physiology: does an incremental exercise test for valid VO<sub>2</sub> max determination really need to last between 8 and 12 minutes? *Sports Med*, 38(6), 441-447.
- Millet, G. P., Faiss, R., & Pialoux, V. (2012). Last word on Point: Counterpoint: Hypobaric hypoxia induces different responses from normobaric hypoxia. *J Appl Physiol* (1985), 112(10), 1795. doi:10.1152/japplphysiol.00338.2012
- Millet, G., Brocherie, F., Faiss, J., & Girard, A. (2015). *Entraînement en altitude dans les sports collectifs*. Louvain-la-Neuve, Belgique: De Boeck supérieur.
- Millet, G. P., Faiss, R., Brocherie, F., & Girard, O. (2013). Hypoxic training and team sports: a challenge to traditional methods? *Br J Sports Med*, 47 Suppl 1, i6-7. doi:10.1136/bjsports-2013-092793
- Millet, G. P., Roels, B., Schmitt, L., Woorons, X., & Richalet, J. P. (2010). Combining hypoxic methods for peak performance. *Sports Med*, 40(1), 1-25. doi:10.2165/11317920-000000000-00000
- Montero, D., & Lundby, C. (2017). No Improved Performance With Repeated-Sprint Training in Hypoxia Versus Normoxia: A Double-Blind and Crossover Study. *Int J Sports Physiol Perform*, 12(2), 161-167. doi:10.1123/ijsp.2015-0691
- Morante, S., & Brotherhood, J. R. (2006). Match characteristics of professional singles tennis. *Med Sci Tennis*, 10(3), 12-13.



- Murias, J. M., Lanatta, D., Arcuri, C. R., & Laino, F. A. (2007). Metabolic and functional responses playing tennis on different surfaces. *J Strength Cond Res*, 21(1), 112-117. doi:10.1519/R-19065.1
- O' Donoghue, P., & Ingram, B. (2001). A notational analysis of elite tennis strategy. *J Sports Sci*, 19(2), 107-115. doi:10.1080/026404101300036299
- Padilla, S., Mujika, I., Orbananos, J., & Angulo, F. (2000). Exercise intensity during competition time trials in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc*, 32(4), 850-856.
- Perini, R., & Veicsteinas, A. (2003). Heart rate variability and autonomic activity at rest and during exercise in various physiological conditions. *Eur J Appl Physiol*, 90(3-4), 317-325. doi:10.1007/s00421-003-0953-9
- Pierce, S. J., Hahn, A. G., Davie, A., & Lawton, E. W. (1999). Prolonged incremental tests do not necessarily compromise VO<sub>2</sub>max in well-trained athletes. *J Sci Med Sport*, 2(4), 356-363.
- Platonov, V. (1988). L'entraînement sportif: Théorie et méthodologie. Paris: Revue EPS.
- Poole, D. C., & Jones, A. M. (2017). Measurement of the maximum oxygen uptake Vo<sub>2</sub>max: Vo<sub>2</sub>peak is no longer acceptable. *J Appl Physiol (1985)*, 122(4), 997-1002. doi:10.1152/jappphysiol.01063.2016
- Poole, D. C., Wilkerson, D. P., & Jones, A. M. (2008). Validity of criteria for establishing maximal O<sub>2</sub> uptake during ramp exercise tests. *Eur J Appl Physiol*, 102(4), 403-410. doi:10.1007/s00421-007-0596-3
- Porcari, J. P., Probst, L., Forrester, K., Doberstein, S., Foster, C., Cress, M. L., & Schmidt, K. (2016). Effect of Wearing the Elevation Training Mask on Aerobic Capacity, Lung Function, and Hematological Variables. *J Sports Sci Med*, 15(2), 379-386.
- Puype, J., Van Proeyen, K., Raymackers, J. M., Deldicque, L., & Hespel, P. (2013). Sprint interval training in hypoxia stimulates glycolytic enzyme activity. *Med Sci Sports Exerc*, 45(11), 2166-2174. doi:10.1249/MSS.0b013e31829734ae
- Rampinini, E., Connolly, D. R., Ferioli, D., La Torre, A., Alberti, G., & Bosio, A. (2016). Peripheral neuromuscular fatigue induced by repeated-sprint exercise: cycling vs. running. *J Sports Med Phys Fitness*, 56(1-2), 49-59.
- Reid, M., Crespo, M., Lay, B., & Berry, J. (2007). Skill acquisition in tennis: research and current practice. *J Sci Med Sport*, 10(1), 1-10. doi:10.1016/j.jsams.2006.05.011
- Reid, M., Duffield, R., Dawson, B., Baker, J., & Crespo, M. (2008). Quantification of the physiological and performance characteristics of on-court tennis drills. *Br J Sports Med*, 42(2), 146-151; discussion 151. doi:10.1136/bjism.2007.036426
- Reid, M., & Schneiker, K. (2008). Strength and conditioning in tennis: current research and practice. *J Sci Med Sport*, 11(3), 248-256. doi:10.1016/j.jsams.2007.05.002
- Reid, M., Morgan, S., & Whiteside, D. (2016). Matchplay characteristics of Grand Slam tennis: implications for training and conditioning. *J Sports Sci*, 34(19), 1791-1798. doi:10.1080/02640414.2016.1139161
- Robertson, R. J., & Noble, B. J. (1997). Perception of physical exertion: methods, mediators, and applications. *Exerc Sport Sci Rev*, 25, 407-452.
- Rodriguez, F. A., Iglesias, X., Feriche, B., Calderon-Soto, C., Chaverri, D., Wachsmuth, N. B., . . . Levine, B. D. (2015). Altitude Training in Elite Swimmers for Sea Level Performance (Altitude Project). *Med Sci Sports Exerc*, 47(9), 1965-1978. doi:10.1249/MSS.0000000000000626
- Roskamm, H., Landry, F., Samek, L., Schlager, M., Weidemann, H., & Reindell, H. (1969). Effects of a standardized ergometer training program at three different altitudes. *J Appl Physiol*, 27(6), 840-847. doi:10.1152/jappl.1969.27.6.840
- Schaun, G. Z. (2017). The Maximal Oxygen Uptake Verification Phase: a Light at the End of the Tunnel? *Sports Med Open*, 3(1), 44. doi:10.1186/s40798-017-0112-1
- Schmitt, L., Hellard, P., Millet, G. P., Roels, B., Richalet, J. P., & Fouillot, J. P. (2006). Heart rate variability and performance at two different altitudes in well-trained swimmers. *Int J Sports Med*, 27(3), 226-231. doi:10.1055/s-2005-865647

- Schmitt, L., Millet, G., Robach, P., Nicolet, G., Brugniaux, J. V., Fouillot, J. P., & Richalet, J. P. (2006). Influence of "living high-training low" on aerobic performance and economy of work in elite athletes. *Eur J Appl Physiol*, *97*(5), 627-636. doi:10.1007/s00421-006-0228-3
- Seiler, K. S., & Kjerland, G. O. (2006). Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: is there evidence for an "optimal" distribution? *Scand J Med Sci Sports*, *16*(1), 49-56. doi:10.1111/j.1600-0838.2004.00418.x
- Sevre, K., Bendz, B., Hanko, E., Nakstad, A. R., Hauge, A., Kasin, J. I., . . . Rostrup, M. (2001). Reduced autonomic activity during stepwise exposure to high altitude. *Acta Physiol Scand*, *173*(4), 409-417. doi:10.1046/j.1365-201X.2001.00925.x
- Smekal, G., Baron, R., Pokan, R., Dirninger, K., & Bachl, N. (1995). Metabolic and cardiorespiratory reactions in tennis-players in laboratory testing and under sport-specific conditions. *Wien Med Wochenschr*, *145*(22), 611-615.
- Smekal, G., Pokan, R., von Duvillard, S. P., Baron, R., Tschan, H., & Bachl, N. (2000). Comparison of laboratory and "on-court" endurance testing in tennis. *Int J Sports Med*, *21*(4), 242-249. doi:10.1055/s-2000-310
- Smekal, G., von Duvillard, S. P., Rihacek, C., Pokan, R., Hofmann, P., Baron, R., . . . Bachl, N. (2001). A physiological profile of tennis match play. *Med Sci Sports Exerc*, *33*(6), 999-1005.
- Smith, K. J., & Billaut, F. (2010). Influence of cerebral and muscle oxygenation on repeated-sprint ability. *Eur J Appl Physiol*, *109*(5), 989-999. doi:10.1007/s00421-010-1444-4
- Smith, K. J., & Billaut, F. (2012). Tissue oxygenation in men and women during repeated-sprint exercise. *Int J Sports Physiol Perform*, *7*(1), 59-67.
- Spencer, M., Bishop, D., Dawson, B., & Goodman, C. (2005). Physiological and metabolic responses of repeated-sprint activities: specific to field-based team sports. *Sports Med*, *35*(12), 1025-1044.
- Stepho, N. K., Martin, D. T., Fallon, K. E., & Hawley, J. A. (2001). Metabolic demands of intense aerobic interval training in competitive cyclists. *Med Sci Sports Exerc*, *33*(2), 303-310.
- Tabata, I., Nishimura, K., Kouzaki, M., Hirai, Y., Ogita, F., Miyachi, M., & Yamamoto, K. (1996). Effects of moderate-intensity endurance and high-intensity intermittent training on anaerobic capacity and VO<sub>2</sub>max. *Med Sci Sports Exerc*, *28*(10), 1327-1330.
- Talbot, P. (1990). Filières énergétiques et temps réel de jeu. *Revue EPS*(226), 24-26.
- Taylor, H. L., Buskirk, E., & Henschel, A. (1955). Maximal oxygen intake as an objective measure of cardio-respiratory performance. *J Appl Physiol*, *8*(1), 73-80. doi:10.1152/jappl.1955.8.1.73
- Van Beekvelt, M. C., Colier, W. N., Wevers, R. A., & Van Engelen, B. G. (2001). Performance of near-infrared spectroscopy in measuring local O<sub>2</sub> consumption and blood flow in skeletal muscle. *J Appl Physiol* (1985), *90*(2), 511-519. doi:10.1152/jappl.2001.90.2.511
- Venturelli, M., Bishop, D., & Pettene, L. (2008). Sprint training in preadolescent soccer players. *Int J Sports Physiol Perform*, *3*(4), 558-562.
- Vergauwen, L., Madou, B., & Behets, D. (2004). Authentic evaluation of forehand groundstrokes in young low- to intermediate-level tennis players. *Med Sci Sports Exerc*, *36*(12), 2099-2106.
- Vergauwen, L., Spaepen, A. J., Lefevre, J., & Hespel, P. (1998). Evaluation of stroke performance in tennis. *Med Sci Sports Exerc*, *30*(8), 1281-1288.
- Vogt, M., Puntchart, A., Geiser, J., Zuleger, C., Billeter, R., & Hoppeler, H. (2001). Molecular adaptations in human skeletal muscle to endurance training under simulated hypoxic conditions. *J Appl Physiol* (1985), *91*(1), 173-182. doi:10.1152/jappl.2001.91.1.173
- Weston, S. B., Gray, A. B., Schneider, D. A., & Gass, G. C. (2002). Effect of ramp slope on ventilation thresholds and VO<sub>2</sub>peak in male cyclists. *Int J Sports Med*, *23*(1), 22-27. doi:10.1055/s-2002-19267

- Wilber, R. L., Stray-Gundersen, J., & Levine, B. D. (2007). Effect of hypoxic "dose" on physiological responses and sea-level performance. *Med Sci Sports Exerc*, 39(9), 1590-1599. doi:10.1249/mss.0b013e3180de49bd
- Zoll, J., Ponsot, E., Dufour, S., Doutreleau, S., Ventura-Clapier, R., Vogt, M., . . . Fluck, M. (2006). Exercise training in normobaric hypoxia in endurance runners. III. Muscular adjustments of selected gene transcripts. *J Appl Physiol (1985)*, 100(4), 1258-1266. doi:10.1152/jappphysiol.00359.2005

## ***Chapitre 6***

### ***Article 1 - Précision et reproductibilité d'une nouvelle machine lance-balles***

## **Article 1: Accuracy and Reliability of a New Tennis Ball Machine**

Brechbuhl C, Millet GP, Schmitt L. *Journal of Sports Science and Medicine* (2016), **15**, 263-267

Research article

## Accuracy and Reliability of a New Tennis Ball Machine

Cyril Brechbuhl<sup>1,2</sup>✉, Grégoire Millet<sup>2</sup> and Laurent Schmitt<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> French Tennis Federation, Stade Roland-Garros, 2 avenue Gordon Bennett, Paris, France; <sup>2</sup> Institute of Sport Sciences (ISSUL), Department of Physiology, Faculty of Biology and Medicine, University of Lausanne, Switzerland; <sup>3</sup> National Centre of Nordic-Ski, Research and Performance, Premanon, France

### Abstract

The aim was to evaluate the reliability of a newly-developed ball machine named 'Hightof', on the field and to assess its accuracy. The experiment was conducted in the collaboration of the 'Hawk-Eye' technology. The accuracy and reliability of this ball machine were assessed during an incremental test, with 1 min of exercise and 30 sec of recovery, where the frequency of the balls increased from 10 to 30 balls·min<sup>-1</sup>. The initial frequency was 10 and increased by 2 until 22, then by 1 until 30 balls·min<sup>-1</sup>. The reference points for the impact were 8.39m from the net and 2.70m from lateral line for the right side and 2.83m for the left side. The precision of the machine was similar on the right and left sides ( $0.63 \pm 0.39$  vs  $0.63 \pm 0.34$  m). The distances to the reference point were  $0.52 \pm 0.42$ ,  $0.26 \pm 0.19$ ,  $0.52 \pm 0.37$ ,  $0.28 \pm 0.19$  m for the Y-right, X-right, Y-left and X-left impacts. The precision was constant and did not increase with the intensity. (e.g ball frequency). The ball velocity was  $86.3 \pm 1.5$  and  $86.5 \pm 1.3$  km·h<sup>-1</sup> for the right and the left side, respectively. The coefficient of variation for the velocity ranged between 1 and 2% in all stages (ball velocity ranging from 10 to 30 balls·min<sup>-1</sup>). Conclusion: both the accuracy and the reliability of this new ball machine appear satisfying enough for field testing and training.

**Key words:** Technology, tennis, testing, training, ball-machine.

### Introduction

The interest and limits of using a ball machine for technical training, physical conditioning or testing in tennis have been previously shown (Baiget et al., 2014; Fargeas-Gluck and Leger, 2012). However the stroke timing of players may be affected by being opposite to a ball machine (Carboch et al., 2014), but it remains interesting to standardize specifically the protocols for physical components development. We emit some limits when the balls are sent by coaches trying to follow a defined rhythm and a ball quality. The reliability may be disturbed by the focus and the attention on technical execution. Therefore we prefer the use of ball machine to allow the fulfillment of physical fitness development on the tennis court. For example, despite the non-specific situation (e.g. no opponent which can create instability in the game), Smekal et al. (2000) or Baiget et al. (2014) used a ball machine (The Playmate TH – Metaltec and the Pop Lob Airmatic 104, respectively) during their specific tennis field tests. However, the use of a mobile ball machine, which could throw balls with different spin, velocities, and rebound zones, would offer new possibilities in training drills and for

testing. More specifically, it would improve the assessment of the energetic and technical capacities of the players during an incremental field test. However, the accuracy and the reliability of such a ball machine have never been published.

The use of a reliable and accurate ball machine can be beneficial in different situations: technical and physical training and testing at any level and age, from the beginner to the elite player; using different types of ball and different exercises.

Therefore, the aim of this study is to evaluate the reliability of a newly-developed ball machine ('Hightof') on court and to assess accuracy of the balls released from this ball machine using the Hawk-Eye technology.

### Methods

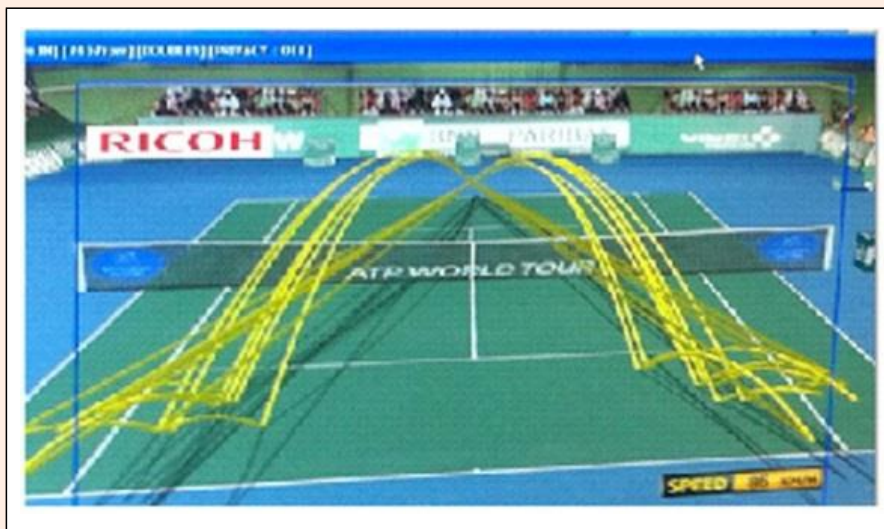
#### Description of the 'Hightof' ball machine

The 'Hightof' ball machine weights 60 kg, for a height of 99 cm, a width of 62 cm and a depth of 70 cm (Figure 1). It holds 300 balls and ejects balls according to the electronic command printed on the screen. The balls are thrown thanks to the technology used with 2 rollers; one roller ejects the ball in a direction pre-defined, the second one makes turn the ball.



**Figure 1.** Dimensions of the 'Hightof' ball machine.

Ball throws are executed by a total of 3 motors to combine parameters of distance, velocity, and time. The



**Figure 2.** Ball speed measured by 'Hawk-Eye' Technology (i.e stage 26 balls·min<sup>-1</sup>).

target zone is controlled by 2 motors. One gives the X axis and the other one the Y axis. Another motor governs the time between ball throws and sequences. With the Hightof<sup>®</sup> machine, there is only one ball velocity corresponding to 86 km·h<sup>-1</sup>. We can only modify the spin. All the settings can be prepared in situ, or before either on a computer or a smartphone. The 'Hightof' machine works with all operating systems.

The device allows setting and recording a predefined program (number and frequency of balls, duration of rallies; ball velocity; zones of impact). Of interest is the possibility for the device to record return ball velocities from the player (with integrated radar).

### Experimental design

The experiment was conducted in the collaboration of the 'Hawk-Eye' technology that was installed for the ATP tournament Paris Bercy Master 1000 (Figure 2). This technology was validated on 14 October 2005, when the ITF announced that 'Hawk-Eye' had met the standards set by the committee comprising representatives of the ITF, ATP and WTA Tour for use in reviewing decisions made by on-court officials. The accuracy and reliability of the ball impact location and the reliability of the ball velocity from the machine were assessed. Even the machine can produce 3 different topspin, we only consider the topspin intermediate, which is currently used during testing and training.

### Incremental test

The accuracy and the reliability of the 'Hightof' machine were assessed during an incremental test, with 1 min of exercise and 30 sec of recovery, where the frequency of the balls increased from 10 to 30 balls·min<sup>-1</sup>. The initial frequency was 10 balls·min<sup>-1</sup> and increased by 2 balls·min<sup>-1</sup> until 22 balls·min<sup>-1</sup>, then by 1 balls·min<sup>-1</sup> until 30 balls·min<sup>-1</sup>. The type of ball ejected by the 'Hightof' ball machine was determined with top spin. The trajectories of balls were programmed from the screen of command of the ball machine. We alternated balls to the right

and to the left on a zone situated between the line of service court and the ledger line of court.

The accuracy of the device was evaluated by the distance calculated by trigonometry between impact and the reference point on right and left sides (Figure 3).

### Statistical analysis

Mean and standard deviation (SD) and coefficient of variation (CV) were calculated for all the ball impacts and ball speeds. CV was calculated as the ratio of the standard deviation by the mean.

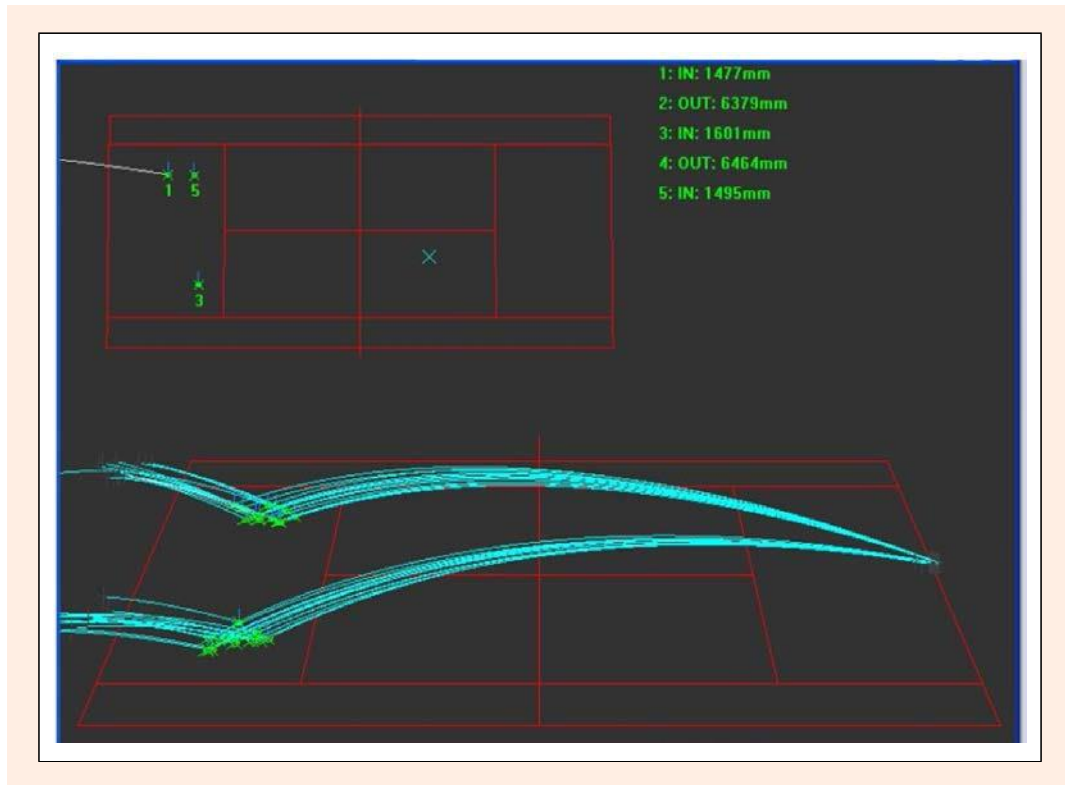
For all variables (i.e. ball velocity and Y and X distances to the reference points), we compared means by paired t-test. We calculated mean (standard deviation), we assessed the strength of the relationships between Hawk-eye and Hightof data using intraclass correlation coefficients (ICC). Finally we calculated mean bias [95% lower limit; 95% upper limit] using the Bland-Altman method.

### Results

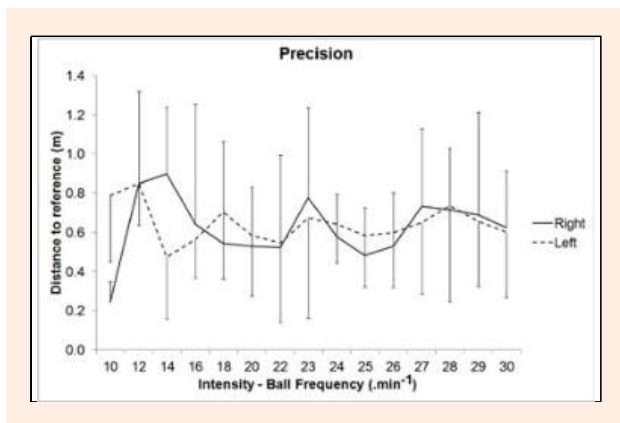
The reference points for the impact were at 8.39 m from the net and 2.70 from lateral line for the right side vs 8.74 m and 2.83 for the left side. The accuracy of the balls released from the 'Hightof' machine (evaluated by the distance calculated by trigonometry between impact and the reference point) was similar on right and left sides ( $0.63 \pm 0.39$  vs  $0.63 \pm 0.34$  m). The accuracy was constant and did not increase with the intensity (e.g. ball frequency) (Figure 4).

The ball velocity (from the machine) was  $86.3 \pm 1.5$  and  $86.5 \pm 1.3$  km·h<sup>-1</sup> for the right and the left side, respectively (Figure 5). The velocity remained stable during the test. The coefficient of variation for the velocity ranged between 1 and 2% in all stages (ball velocity ranging from 10 to 30 balls·min<sup>-1</sup>).

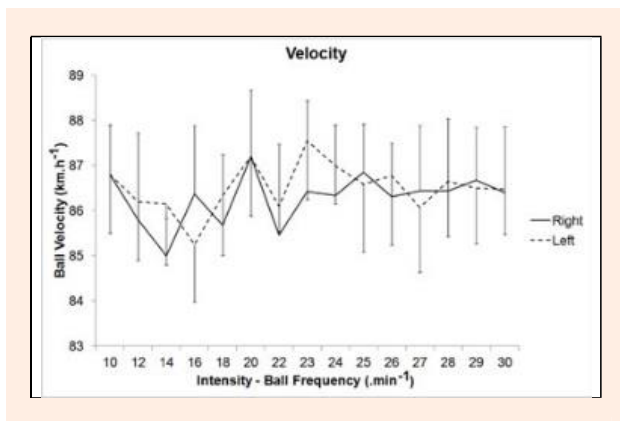
The distances to the reference point were  $0.52 \pm 0.42$ ,  $0.26 \pm 0.19$ ,  $0.52 \pm 0.37$ ,  $0.28 \pm 0.19$  m for the Y-right, X-right, Y-left and X-left impacts. The means for ball speed (right and left sides) and impact location (X



**Figure 3.** Ball impact measured by ‘Hawk-Eye’ during the experiment (i.e stage 26 balls·min<sup>-1</sup>).



**Figure 4.** Accuracy of the ‘Hightof’ ball machine: distance of impact to the reference point on right and left side of the court at ball frequencies increasing from 10 to 30 balls·min<sup>-1</sup>.



**Figure 5.** Velocity of the ball from the ‘Hightof’ ball machine on right and left side of the court at ball frequencies increasing from 10 to 30 balls·min<sup>-1</sup>.

and Y axes on right and left sides) were not statistically different with p values from paired t-test ranging between 0.59 and 0.97.

The mean bias and 95% limits of agreement using the Bland-Altman method are -0.06 [-3.04; 2.92] km·h<sup>-1</sup> for the ball velocity on right side; 0.04 [-2.59; 2.50] km·h<sup>-1</sup> on left side; 0.00 [-0.82; 0.81], 0.00 [-0.38; 0.37], 0.00 [-0.72; 0.72] and 0.01 [-0.37; 0.39] m for the Y-right, X-right, Y-left and X-left impacts.

### Discussion

The accuracy and the reliability of the ‘Hightof’ ball machine were assessed by using the ‘Hawk-Eye’ Technology. Both the accuracy and the reliability of the new ball machine appear satisfying enough for field testing. The ball velocity was relevant for an analysis of the quality of ball during technical drills, as practiced by professional tennis players (86 km·h<sup>-1</sup> for topspin balls) (Fernandez-Fernandez et al., 2010). Moreover, the high reliability of the speed would allow accurate displacements of the players from left to right during tests and avoid to surprise the player during a sequence (Figure 5). The accuracy of the balls released from the ball machine supported by the low standard deviation at the different ball frequencies (Figure 4) would allow a good practice of the drills and to anticipate the run distance by the athletes.

The use of a reliable and accurate ball machine can be beneficial in different situations: technical and physical training, and testing at any level and age, from the beginner to the elite player, using different types of ball and different exercises. The ‘Hightof’ has already been used in few studies to assess new design of aerobic training



with or without ball hitting (Pialoux et al., 2015) and to highlight the interest to implement motor imagery during such task-specific training (Guillot et al., 2015). It underlines first the interest to use ball machine for standardizing and optimizing the training time, and secondly the usefulness of this new technology in the way of specific fitness testing, and training. However, the practical relevance of the study remains limited as only a fixed ball velocity was tested for reliability. For players with different characteristics (e.g. age, beginners versus professionals, etc.), the selection of different ball speeds should be possible. Therefore, further studies investigating the reliability of different ball velocities as well as various ball rotations (i.e. spin) are required.

We cannot compare the present results with the existing literature since the accuracy and the reliability of any ball machine have never been published. The relevance of shuttle running tests has been questioned in tennis, leading to the development of so-called "sport specific" protocols. Therefore, recent field tests have been used in tennis to determine the endurance capacity (Girard et al., 2006; Smekal et al., 2000) or technical performance (i.e., stroke precision, accuracy) (Fernandez-Fernandez et al., 2010; Smekal et al., 2000) of athletes with acceptable accuracy under standardized conditions. However, for further improving the specificity of these tests, two points are important: 1) the use of the tennis court dimensions and 2) the combination of specific footwork and hitting actions. None of the previous tests proposed replicates the characteristics of the tennis actions. During the Navten test (Fargeas-Gluck and Leger, 2012), the coach throws the balls to hit the target zone at a frequency that increases at each 1-min stage. The rhythm is conducted by a CD player. During the specific incremental field test of Girard et al. (2006) and the Hit and Turn Tennis Test (Ferrauti et al., 2011), players were instructed to mime a powerful stroke without ball. In our opinion, any specific field test requires "real strokes" and therefore using a ball machine. Then the reliability of this test would be highly dependent of the validity and the reliability of the ball thrown. In addition, the ball machine has to be portable, capable of operating under a wide range of environmental conditions, and able to operate accurately, simply and quickly. Since the 'Hightof' ball machine appears as accurate and reliable, it should lead to more efficient and specific evaluation design and associated physical training programs.

## Conclusion

The present study aimed to evaluate the reliability of a newly-developed ball machine named 'Hightof', on the field and to assess its accuracy. Both the accuracy and the reliability of this new ball machine appear satisfying enough for field testing and training.

## Acknowledgements

No external funding was received for this work. Thanks go to the HighTof company for the loan of the ball machine. The authors have no conflicts of interest that are directly relevant to the content of this article. We thank the Paris Bercy Master 1000 organisation to have deal with the 'Hawk-Eye' society the opportunity to get essential data.

## References

- Baiget, E., Fernandez-Fernandez J., Iglesias X., Vallejo L. and Rodriguez, F.A. (2014) On-court endurance and performance testing in competitive male tennis players. *Journal of Strength Conditioning and Research* **28**, 256-264.
- Carboch, J., Suss, V. and Kocib, T. (2014) Ball machine usage in tennis: movement initiation and swing timing while returning balls from a ball machine and from a real server. *Journal of Sports Science and Medicine* **13**(2), 304-308.
- Fargeas-Gluck, M.A. and Leger, L.A. (2012) Comparison of two aerobic field tests in young tennis players. *Journal of Strength Conditioning and Research* **26**, 3036-3042.
- Fernandez-Fernandez, J., Kinner, V. and Ferrauti, A. (2010) The physiological demands of hitting and running in tennis on different surfaces. *Journal of Strength Conditioning and Research* **24**, 3255-3264.
- Ferrauti, A., Kinner, V. and Fernandez-Fernandez, J. (2011) The Hit & Turn Tennis Test: an acoustically controlled endurance test for tennis players. *Journal of Sports Sciences* **29**, 485-494.
- Girard, O., Chevalier, R., Leveque, F., Micallef, J.P. and Millet, G.P. (2006) Specific incremental field test for aerobic fitness in tennis. *British Journal of Sports Medicine* **40**, 791-796.
- Guillot, A., Di Rienzo, F., Pialoux, V., Simon, G., Skinner, S. and Rogowski, I. (2015) Implementation of motor imagery during specific aerobic training session in young tennis players. *PLoS One* **10**(11), e0143331.
- Smekal, G., Pokan, R., von Duvillard, S.P., Baron, R., Tschan, H. and Bachl, N. (2000) Comparison of laboratory and "on-court" endurance testing in tennis. *International Journal of Sports Medicine* **21**, 242-249.

## Key point

- The reliability and accuracy of a new ball machine named 'Hightof' were assessed.
- The impact point was reproducible and similar on the right and left sides ( $\pm 0.63$  m).
- The precision was constant and did not increase with the intensity (e.g. ball frequency).
- The coefficient of variation of the ball velocity ranged between 1 and 2% in all stages (ball velocity ranging from 10 to 30 balls $\cdot$ min $^{-1}$ ).

## AUTHOR BIOGRAPHY



### Cyril BRECHBUHL

#### Employment

National physical trainer for the French Tennis Federation

#### Degree

PhD Candidate

#### Research interests

**Grégoire P. MILLET****Employment**

Professor of exercise physiology

**Degree**

PhD

**Research interests**

Innovative training methods in hypoxia for intermittent sports, optimization of

**Laurent SCHMITT****Employment**

Director of the Research Department

**Degree**

PhD

**Research interests****✉ Cyril Brechtbuhl**

French Tennis Federation, Stade Roland-Garros, 2 avenue Gordon Bennett, Paris, France

## ***Chapitre 7***

### ***Article 2- Vers l'utilisation d'un Test d'Effort Spécifique au Tennis (TEST) avec frappes de balles chez des joueurs élite.***

**Article 2- On the Use of a Test to Exhaustion Specific to Tennis (TEST) with Ball Hitting by Elite Players.**

Brechbuhl C, Girard O, Millet GP, Schmitt L. PLoS ONE (2016); 11, 4

# On the Use of a Test to Exhaustion Specific to Tennis (TEST) with Ball Hitting by Elite Players

Cyril Brechbuhl<sup>1,2✉✉\*</sup>, Olivier Girard<sup>2✉✉b</sup>, Grégoire P. Millet<sup>2✉✉b</sup>, Laurent Schmitt<sup>2,3✉✉c</sup>

**1** National Technical Direction, French Tennis Federation, Paris, France, **2** Department of Physiology, Institute of Sport Sciences (ISSUL), Faculty of Biology and Medicine, University of Lausanne, Lausanne, Switzerland, **3** Department of Research and Performance, National Centre of Nordic-Ski, Premanon, France

✉ These authors contributed equally to this work.

✉a Current address: Fédération Française de Tennis, Centre National d'Entraînement, Stade Roland-Garros, Paris, France

✉b Current address: Institut des sciences du sport de l'Université de Lausanne (ISSUL), Bâtiment Géopolis, Lausanne, Suisse

✉c Current address: Centre National de Ski Nordique, Lieu dit Jacobeys, Prémanon, France

\* [cyril.brechbuhl@unil.ch](mailto:cyril.brechbuhl@unil.ch)



## Abstract

### Purpose

We aimed to a) introduce a new Test to Exhaustion Specific to Tennis (TEST) and compare performance (test duration) and physiological responses to those obtained during the 20-multistage shuttle test (MSST), and b) determine to which extent those variables correlate

with performance level (tennis competitive ranking) for both test procedures.

### Methods

Twenty-seven junior players (8 males, 19 females) members of the national teams of the French Tennis Federation completed MSST and TEST, including elements of the game (ball hitting, intermittent activity, lateral displacement), in a randomized order. Cardiorespiratory responses were compared at submaximal (respiratory compensation point) and maximal loads between the two tests.

### Results

At the respiratory compensation point oxygen uptake ( $50.1 \pm 4.7$  vs.  $47.5 \pm 4.3$  mL.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>,  $p = 0.02$ ), but not minute ventilation and heart rate, was higher for TEST compared to MSST. However, load increment and physiological responses at exhaustion did not differ between the two tests. Players' ranking correlated negatively with oxygen uptake measured at submaximal and maximal loads for both TEST ( $r = -0.41$ ;  $p = 0.01$  and  $-0.55$ ;  $p = 0.004$ ) and MSST ( $r = -0.38$ ;  $P = 0.05$  and  $-0.51$ ;  $p = 0.1$ ).

### Conclusion

Using TEST provides a tennis-specific assessment of aerobic fitness and may be used to prescribe aerobic exercise in a context more appropriate to the game than MSST. Results

## OPEN ACCESS

**Citation:** Brechbuhl C, Girard O, Millet GP, Schmitt L (2016) On the Use of a Test to Exhaustion Specific to Tennis (TEST) with Ball Hitting by Elite Players. PLoS ONE 11(4): e0152389. doi:10.1371/journal.pone.0152389

**Editor:** Andrea Macaluso, University of Rome Foro Italico, ITALY

**Received:** October 27, 2015

**Published:** April 1, 2016

**Copyright:** © 2016 Brechbuhl et al. This is an open access article distributed under the terms of the

[Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

**Data Availability Statement:** All relevant data are within the paper.

**Funding:** These authors have no support or funding to report.

**Competing Interests:** The authors have declared that no competing interests exist.

also indicate that  $\dot{V}O_2$  values both at submaximal and maximal load reached during TEST and MSST are moderate predictors of players competitive ranking.

## Introduction

Tennis is a sport that requires a mixture of speed, agility, strength, and power combined with moderate-to-high aerobic and anaerobic capacities [1,2]. Although the sport-specific technical skills and tactical choices are predominant factors, players require a well-developed physical conditioning to execute advanced shots and maintain stroke efficiency as fatigue develops [3]. Evaluation of aerobic fitness is commonly used to characterize training effects, evaluate physical fitness, and identify target training areas [4]. When assessing players' aerobic fitness level the 'Gold-standard' protocol is the direct measurement of maximal oxygen uptake ( $\dot{V}O_{2max}$ ) while running to exhaustion (i.e., progressive running speed increments) on a treadmill in a laboratory environment [5].

In tennis, a large variety of field running protocols, from which either indirect (i.e., estimation from performance achieved) or direct (i.e., using portable gas analyzer)  $\dot{V}O_2$  measurements are derived, have been popularized over the last 30 years [6,7]. The 20-m multistage shuttle test (MSST) is probably the most popular field procedure in the tennis community, and represents an integral part of the regular test battery of leading national tennis federations (US tennis association, Tennis Australia, French Tennis Federation) [1]. However, MSST is known to under-predict  $\dot{V}O_{2max}$  among racket-sport players [8]. Furthermore, it is only semi-specific to tennis, as it does not accurately reflect movement patterns that are typically performed on court. Hence, MSST cannot simulate the specific muscular involvement of the upper limbs with respect to ball hitting. Playing tennis also requires rapid directional changes after covering a distance of less than 5 m, yet players would only have to change direction every 20 m during MSST.

Over the past decade, field-based test protocols have been developed to evaluate aerobic fitness of tennis players in a context more appropriate to the game [1,9–12]. For instance, the Girard Test [11] and the Hit & Turn Tennis Test [10], two incremental protocols (i.e., stages duration of 40–50 s, interspersed by 10–20 s of rest and including movements' speed/direction changes controlled by visual and/or auditory feedbacks) to exhaustion, have been popularized. The main drawback of these test procedures, however, is that background strokes are simulated (i.e., stroke mimic actions) so that there is actually no "hitting of the ball" (i.e., racket / ball contact). To our knowledge, there is no direct comparison in the literature of cardiorespiratory responses or energy expenditure during tennis tests performed with vs. without ball hitting.

Moreover, large between-player differences regarding the intensity of the mimed strokes may thereby complicate standardization of these tests. This is not a trivial issue since the work of upper limbs, known to influence the overall energetic demand in tennis [13] would likely modify the physiological responses when players are required or not to hit the ball. For example, hitting backstrokes was shown to induce 2–10% higher physiological measurements than forehands [13,14], which increased with stroke velocities.

More recently, the Baiget Test [9] that includes ball hitting at increasing intensity from a throwing machine has been proposed. This test actually builds on the test originally developed by Smekal et al. [12]. In the original version of the "on-court" test [12] players began hitting balls at a ball frequency (BF) of 12 shots.min<sup>-1</sup>, which was further increased by 2 shots.min<sup>-1</sup> every 3 minutes. Compared to this original test procedure [12], the main modifications incorporated in the Baiget Test were (a) the inclusion of shorter stages (3 vs. 2 minutes) and (b) a

slower starting BF (12 vs. 9 shots.min<sup>-1</sup>) [9]. These changes were likely implemented to limit test duration, which favors more accurate determination of the main cardiorespiratory parameters at specific time points (i.e., respiratory compensation point (RCP) and maximal load) when evaluating aerobic fitness. In the Baiget Test [9], however, the activity is continuous in nature without inclusion of any recovery breaks characterizing intermittent efforts in tennis. By comparing physiological responses between their field-based procedure and a discontinuous treadmill test, Girard et al. [11] highlighted that laboratory tests underestimate  $\dot{V}O_{2max}$  values, while cardiorespiratory variables measured at submaximal intensities did not differ. No such comparison has been made for the other available tennis-specific incremental procedures [9,10,12]. When it comes to estimate aerobic fitness of tennis players, determining whether physiological responses to a newly designed protocol are similar or not compared to a 'reference' test (MSST) is practically relevant.

In racket sports, as in every sport, the physiological responses are known to differ between players of various playing standards. It is therefore informative for the coach to establish the ability of a test procedure to discriminate players of various standards. Although time to exhaustion between a squash and a treadmill test were not different, only performance during the squash test correlated with players' ranking [15]. More specifically, Baiget et al. [9] highlighted the usefulness of using technical effectiveness combined with physiological parameters at submaximal intensity (e.g. respiratory compensation point, RCP) to best predict tennis performance level. Reporting the nature of the relationship of test duration and/or physiological outcomes with players' competitive ranking is therefore crucial, for instance, to assess seasonal changes in players' fitness.

Therefore, we aimed to a) introduce and validate a Test to Exhaustion Specific to Tennis (the so-called TEST) including elements of the game (i.e., actual ball hitting, lateral displacements, intermittent activity), b) compare TEST performance (test duration) and physiological responses (i.e., at RCP and maximal load) to those obtained during a 'classical' field procedure (MSST) highly popular in a large number of clubs and federations, and c) determine to which extent test duration and  $\dot{V}O_2$  values for both test procedures correlate with performance level (competitive ranking). We hypothesized that cardiorespiratory responses derived from TEST would be higher than MSST and that TEST would be a better predictor of players' ranking.

## Methods

### Ethic Statement

Both the players and their parents (for minors) provided written informed consent for the study after the procedures and potential risks associated with participation in the study were fully explained. The scientific committee of the French Tennis Federation approved the study that was performed in accordance with the ethical standards reported [16], and conformed to the recommendations of the Declaration of Helsinki.

### Subjects

Twenty-seven high-level competitive tennis players (8 males and 19 females) (mean  $\pm$  SD; age: 16.8  $\pm$  0.9 years; height: 185.4  $\pm$  5.3 cm; body mass: 75.8  $\pm$  7.2 kg for males and age: 17.2  $\pm$  2.4 years; height: 173.3  $\pm$  9.9 cm; body mass: 64.7  $\pm$  9.5 kg for females), volunteered to participate in the study. They were all members of the national teams of the French Tennis Federation (international tennis number (ITN): 1 (elite)). The mean training background of the players was 11.0  $\pm$  3.5 years and the training regimen was 6 d.week<sup>-1</sup> with a training volume of 24.0  $\pm$  2.1 h.week<sup>-1</sup>. Players were focusing 15.1  $\pm$  1.2 h.week<sup>-1</sup> on tennis-specific training (i.e.

technical and tactical skills), while their fitness routine also included aerobic and anaerobic (i.e. on-court and off-court exercises;  $4.4 \pm 0.3$  h.week<sup>-1</sup>) conditioning as well as strength ( $5.2 \pm 0.5$  h.week<sup>-1</sup>) training. During the three months before testing (November), they participated regularly to official tennis competitions (i.e. “International Tennis Federation Juniors”, and “International Tennis Federation Futures” or ATP tournaments) for a total of 5–10 matches monthly.

## Experimental Design

All participants performed two incremental protocols to exhaustion in randomized order: the ‘traditional’ MSST [17] and a new Test to Exhaustion Specific to Tennis (the so-called TEST). Each test was conducted under similar standard environmental conditions (temperature ~ 20°C, relative humidity ~ 50%) at the same time of day ( $\pm 2$ h), 2 days apart, on an indoor tennis court (i.e., GreenSet surface, GreenSet Worldwide S.L., Barcelona, Spain). All participants were given written and verbal instructions to report for testing in a well-rested, well-hydrated and well-nourished state, and to refrain from eating at least two hours before testing. They were told to refrain from strenuous training the day before the test. All players were familiar with MSST as part of their regular (twice yearly) physical performance assessment. One week before the main experimental visits, all participants attended one familiarization session where TEST requirements were explained. At this occasion, players performed TEST (yet without mouth mask) so as to limit any learning effect.

## Experimental procedures

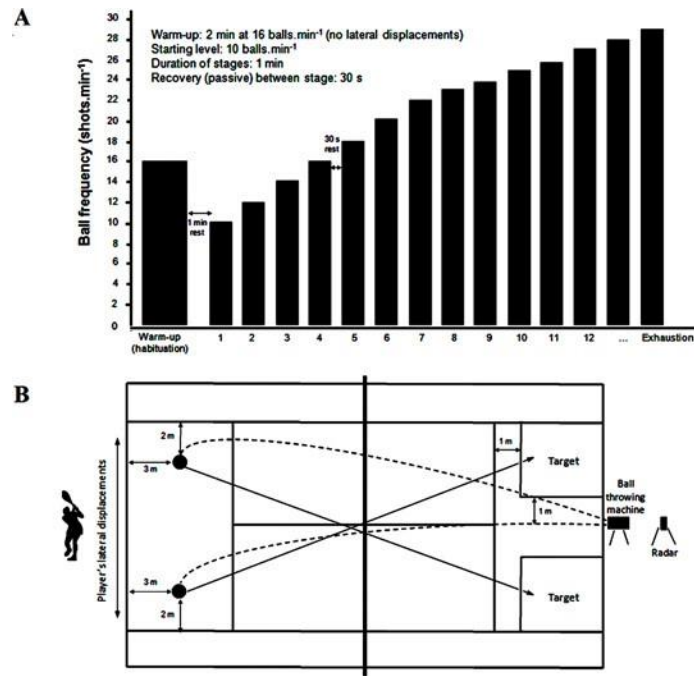
**The 20-m multiple-shuttle-run test (MSST).** MSST procedure has been described elsewhere [17]. Briefly, participants ran back and forth on a 20-m course, starting at a running speed of 8.5 km.h<sup>-1</sup>, which was then increased by 0.5 km.h<sup>-1</sup> every minute. The running pace was regulated by a prerecorded audiotape, signaling when participants needed to be at one or the other end of the 20-m course. Participants were encouraged to complete as many stages of the MSST as possible, and the test was terminated when they were unable to maintain the prescribed pace. Specifically, participants were given a warning the first time they were behind the sound signal (~1 m was allowed), and MSST was immediately stopped on the second warning. Total duration of MSST was recorded [7].

**Test to Exhaustion Specific to Tennis (TEST).** TEST procedure consisted of hitting balls thrown at constant velocity (mean: 86 km.h<sup>-1</sup>; coefficient of variation for ball speed = 1.7% and 1.5% for right and left corners of the baseline, respectively, alternating forehand and backhand strokes (Fig 1) by a ‘Hightof’ ball machine. Players had to hit balls cross-court in a prescribed pattern (i.e., topspin drive), while the landing point for thrown balls was set 3 meters in front of baseline (Fig 1). Slice strokes were not allowed because of their potential influence on ball positioning and therefore on TEST performance and associated physiological responses.

A standardized warm-up preceded TEST. It consisted of cycling an ergocycle (75W–100W), for 10 min. TEST started with a 2-min ‘habituation’ phase where a BF of 16 shots.min<sup>-1</sup> with balls thrown to the central area of the court (minimal lateral displacement) was adopted. After one minute of passive rest, the main test procedure begun: a BF of 10 shots.min<sup>-1</sup> was first selected, which was then increased by 2 shots.min<sup>-1</sup> every minute until the stage corresponding to a BF of 22 shots.min<sup>-1</sup>. From there, increment in BF was set at +1 shots.min<sup>-1</sup> (Fig 1). After each 1-min stage, a 30-s passive recovery break (quiet standing) was implemented.

Players were told to “hit the ball with the best possible velocity/accuracy ratio”. Stroke involvement was motivated by ‘live’ (immediate) feedback. Specifically, players were informed about inappropriate ball velocities (ball velocity < 80 km.h<sup>-1</sup>) and precision (30% of balls landing outside the target zone) at the end of each stage completed. Ball speed was measured with a





**Fig 1.** TEST design (A) and schematic setting (B) for the Test to Exhaustion Specific to Tennis (TEST).

doi:10.1371/journal.pone.0152389.g001

Solstice1 radar (Hightof<sup>1</sup>, France). To ensure standardized playing conditions, a minimum of 100 balls (Roland Garros<sup>1</sup>) was used every 6 tests.

TEST ended with player's voluntary exhaustion or was stopped by the researchers if: i) the players felt exhausted or failed to hit the ball twice in a row or ii) the player was no longer able to perform strokes with an acceptable execution technique and a demise in velocity/precision, as determined by experienced coaches, (i.e., national level coaches with > 15 years of experience at the elite level) through subjective observation. Specifically, participants were given a warning the first time they disrespect the rules, while they were stopped on the second warning. Performance was measured as the total test duration.

### Physiological measurements

During both tests the following ventilatory breath-by-breath gas exchange and five-second heart rate (Suunto Ambit2, Vantaa, Finland) values were continuously recorded using the Metamax II CPX system (Cortex, Leipzig, Germany): oxygen uptake ( $\dot{V}O_2$ ), carbon dioxide production ( $\dot{V}CO_2$ ), respiratory exchange ratio ( $=\dot{V}CO_2 \cdot \dot{V}O_2^{-1}$ ), and minute ventilation ( $\dot{V}E$ ). Gas and volume calibration of the measurement device were performed before each test according to manufacturer's instructions.

The American College of Sports Medicine [18] recommends four criteria to determine maximal effort during incremental tests: i)  $\dot{V}O_{2max}$  plateau defined as an increase of less than 1.5 mL.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup> despite progressive increases in exercise intensity, ii) a final respiratory exchange ratio of 1.1 or above, iii) a final heart rate above 95% of the age related heart rate<sub>max</sub>, and iv) a final blood lactate concentrations above 8 mmol.L<sup>-1</sup> [18]. Ratings of perceived exertion were recorded using the Borg 6–20 scale at the end of each test. Furthermore, 25 µl capillary blood samples were taken from fingertip and analysed for blood lactate concentrations by using the lactate Pro (LT-1710, Arkray, Japan) [19] portable analyser at the beginning and 15 s after exhaustion.

## Detection of respiratory compensation point (RCP)

RCP detection was done by analyzing the points of change in slope (breaks in linearity) of ventilatory parameters [11,20,21]. RCP was determined using the criteria of an increase in  $\dot{V}E/\dot{V}O_2$  with no increase in  $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$  and departure from the linearity of  $\dot{V}E$ . All assessments of the RCP were made by visual inspection of graphs of time plotted against each relevant respiratory variable measured during testing. All visual inspections were carried out by two experienced exercise physiologists. The results were then compared and averaged. The difference in the individual determinations of RCP was < 3%.

## Players' ranking

The international tennis ranking (ATP, WTA and ITF junior) was used to rank players from 1 to 27 in our population sample, with all male players achieving a better ranking than any of the woman players. Players competitive level was confirmed by the professional national coaches of the French Tennis Federation.

## Data analysis

In both tests, the gas samples were averaged every 30 s for further analysis, and the highest values for  $\dot{V}O_2$  and heart rate over 30 s were regarded as  $\dot{V}O_{2max}$  and heart rate<sub>max</sub>. Each physiological variable corresponding to RCP and maximal load was expressed in absolute terms. Physiological variables were then interpolated and further compared using time frames corresponding to 10% of the total duration of each test.

## Statistical analysis

Mean ( $\pm$ SD) was calculated for all variables. Data obtained at RCP and maximal load were compared between MSST and TEST using paired sample-t tests.  $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}E$ , and heart rate curves were compared using a two-way repeated measures analysis of variance [Condition: (MSST vs. TEST) x Time: (10%, 20% . . . 100% of test duration)]. However, when the normality test failed, a Mann-Whitney rank sum test was performed between tests at each time interval. The Bonferroni test was used for post hoc comparisons. Finally, performance and  $\dot{V}O_2$  corresponding to RCP and maximal load were also correlated with the competitive level (ranking) of the players using Pearson rank order correlation for both tests. Data were tested for normality (Shapiro–Wilk test) and equality of variance (Fisher–Snedecor F-test). Where significant effects were established, pairwise differences were identified using the Bonferroni post hoc analysis procedure adjusted for multiple comparisons. The following criteria were adopted to interpret the magnitude of  $r$ : <0.1, trivial; 0.1–0.3, small; 0.3–0.5, moderate; 0.5–0.7, large; 0.7–0.9, very large; and 0.9–1.0, almost perfect [22]. Statistical significance was accepted at  $p \leq 0.05$ . The statistical analyses were performed using SigmaStat 3.5 software.

## Results

### Test performance

Test duration was longer ( $p = 0.001$ ) for TEST ( $908 \pm 94$  s) compared with MSST ( $665 \pm 100$  s). The number of players who satisfied the criteria for maximum effort for each test is displayed in [Table 1](#).

**Table 1. Number of athletes who satisfied the criteria for a maximum**

	TEST	MSST
VO <sub>2</sub>	27 (100%)	21 (78%)
RER	27 (100%)	25 (96%)
HR	21 (78%)	23 (85%)
La <sup>-</sup>	22 (81%)	24 (89%)

RER, respiratory exchange ratio; HR, heart rate.

doi:10.1371/journal.pone.0152389.t001

### Physiological responses

At submaximal load (RCP), higher  $\dot{V}O_2$  values were recorded for TEST compared to MSST (+5.2%;  $p = 0.05$ ) (Table 2B). However,  $\dot{V}E$  and heart rate values did not differ between tests. When data were compared at similar relative exercise durations (10% increments), there were no differences between tests (i.e., all  $p$  values  $> 0.05$  for condition  $\times$  time interaction effects) for any physiological variable (Fig 2). At maximal loads,  $\dot{V}O_{2max}$ ,  $\dot{V}E_{max}$ , heart rate<sub>max</sub>, blood lactate concentration and ratings of perceived exertion values did not differ between TEST and MSST (Table 2A).

### Correlations of test performance and physiological responses with competitive level

The players' ranking was negatively correlated with  $\dot{V}O_{2max}$  for both TEST and MSST ( $r = -0.55$ ;  $p = 0.04$  and  $-0.51$ ;  $p = 0.1$ ) (Fig 3A). Significant Pearson's  $r$  coefficients were observed between ranking and  $\dot{V}O_2$  obtained at RCP and expressed both with absolute (TEST:  $r = -0.41$ ,  $p = 0.01$ ; MSST:  $r = -0.38$ ,  $p = 0.05$ ) values (Fig 3B). Finally, MSST ( $r = -0.46$ ,  $p = 0.01$ ), but not TEST ( $r = 0.04$ ,  $p = 0.8$ ), duration correlated negatively with competitive level.

## Discussion

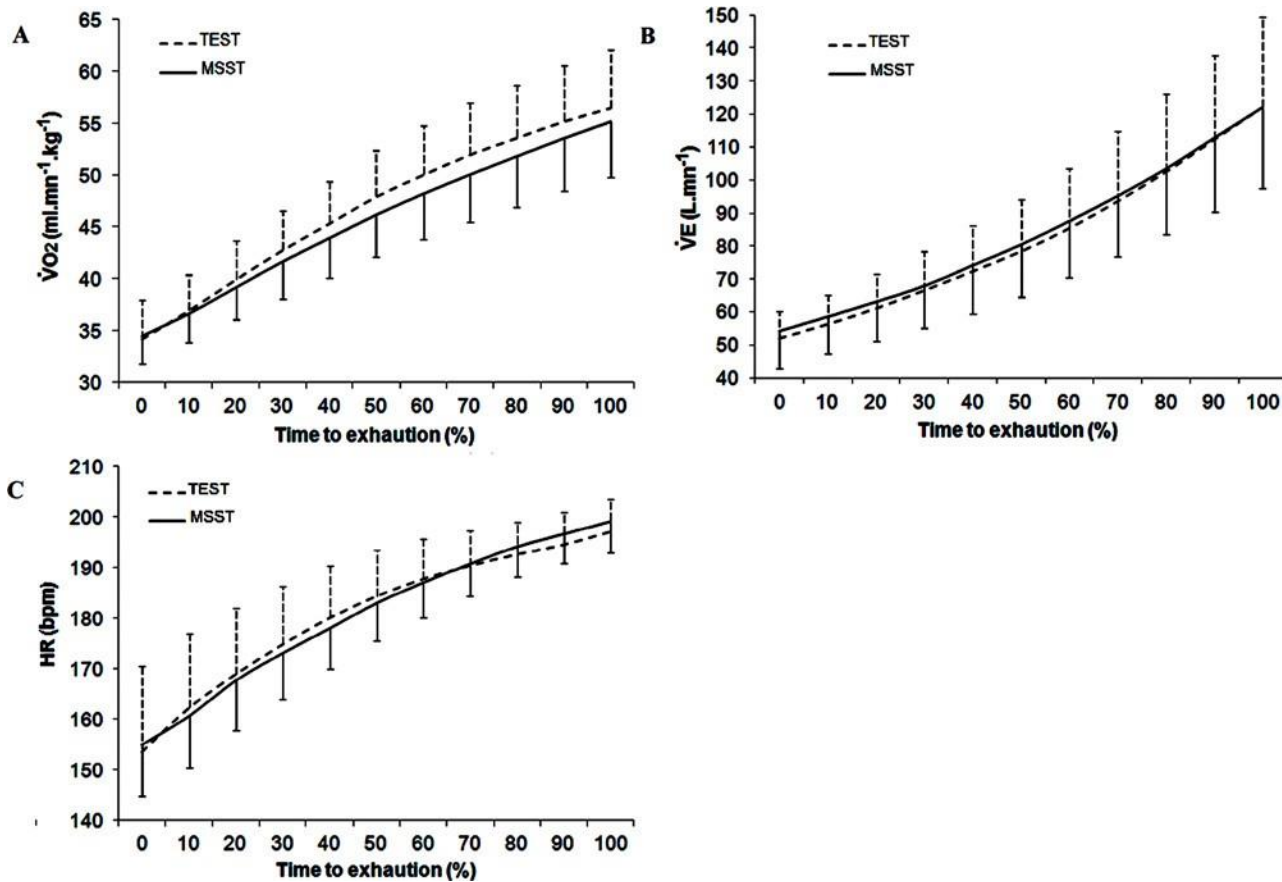
### TEST design and methodological considerations

In order to better standardize parameters influencing  $\dot{V}O_2$  response, we decided not to stimulate the great variety of playing situations during a tennis match (i.e., low level of uncertainty in

**Table 2.** A: maximal levels and significant differences in maximal oxygen uptake ( $VO_{2max}$ ), ventilation ( $VE_{max}$ ), heart rate ( $HR_{max}$ ), lactates ( $[La^-]_{max}$ ) and ratings of perceived exertion scale (RPE) between the specific tennis test (TEST) and the 20m shuttle run test (MSST); B: levels of  $VO_2$ ,  $VE$  and HR at respiratory compensation point (RCP) between TEST and MSST. Data are expressed as mean  $\pm$  standard deviation.  $P \leq 0.05$  for differences between TEST and MSST.

A: Maximal level	TEST	MSST	P
VO <sub>2max</sub> (mL.mn <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> )	56.5 $\pm$ 5.6	55.2 $\pm$ 5.5	0.25
VE <sub>max</sub> (L.mn <sup>-1</sup> )	121.1 $\pm$ 26.7	122.1 $\pm$ 24.9	0.77
HR <sub>max</sub> (bpm)	197.2 $\pm$ 6.5	199.2 $\pm$ 6.3	0.24
[La <sup>-</sup> ] <sub>max</sub> (mmoles.L <sup>-1</sup> )	9.7 $\pm$ 3.3	9.6 $\pm$ 2.3	0.92
RPE	17.1 $\pm$ 1.4	16.4 $\pm$ 1.6	0.18
B: RCP level			
VO <sub>2</sub> (mL.mn <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> )	50.1 $\pm$ 4.7	47.5 $\pm$ 4.3	0.05
VE (L.mn <sup>-1</sup> )	85.4 $\pm$ 18.2	84.2 $\pm$ 16.5	0.97
HR (bpm)	187.7 $\pm$ 7.9	185.2 $\pm$ 7.3	0.66

doi:10.1371/journal.pone.0152389.t002

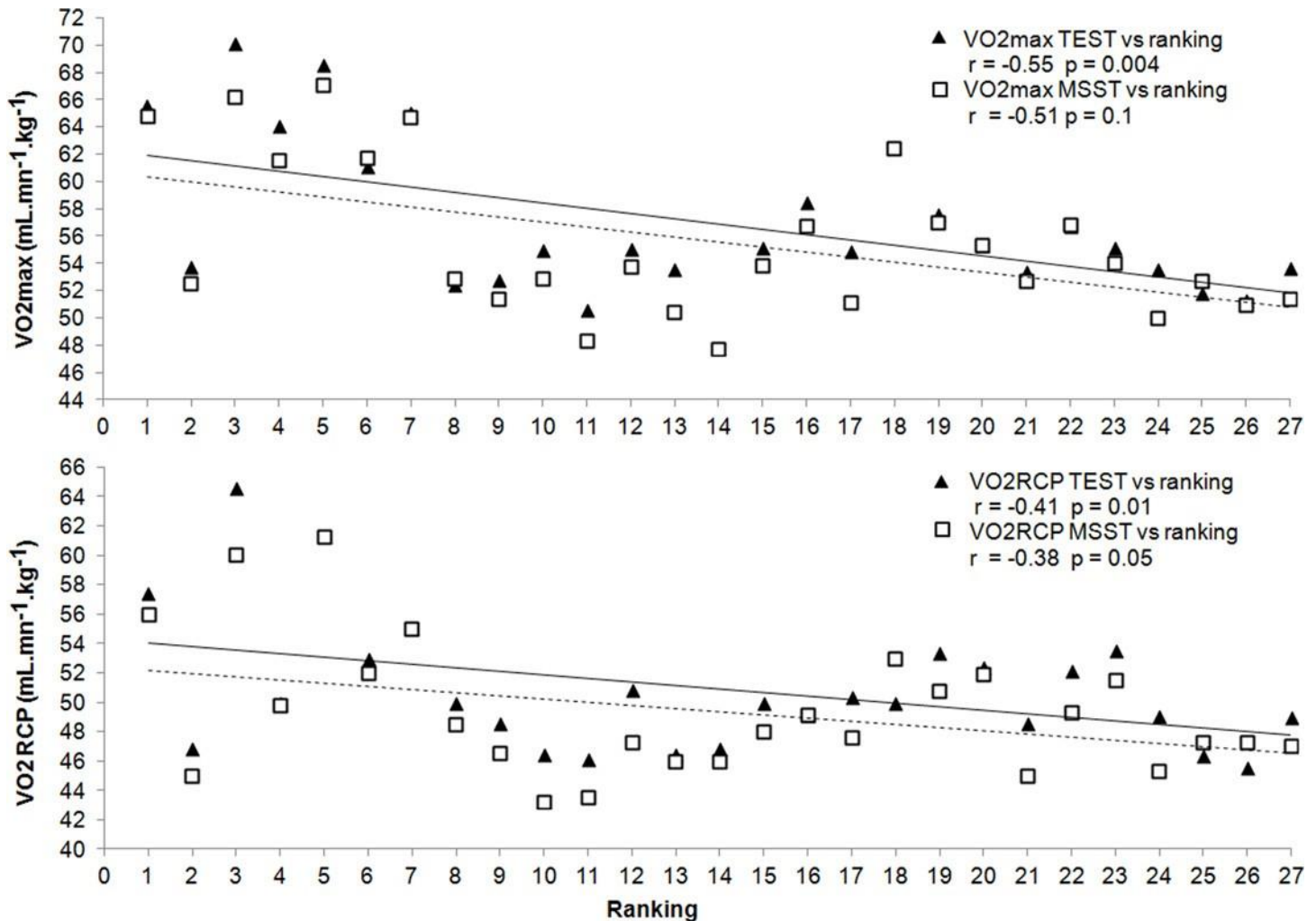


**Fig 2. Oxygen uptake ( $\dot{V}O_2$ , A), minute ventilation ( $\dot{V}E$ , B), and heart rate (HR, C) during TEST and MSST in tennis players (n = 27). Data are expressed relatively (10% frames) as a function of total test duration.**

doi:10.1371/journal.pone.0152389.g002

the protocol so that progress cannot be associated with a learning process) and maintain constant ball quality produced by the machine. Indeed, Bekraoui et al. [14] observed that offensive strokes mobilize 6.5% more energy than defense ones. Furthermore, energy required for hitting backhands is 7% higher than for forehands in club-level players. Fernandez-Fernandez et al.

[13] also found higher energy cost for forehands (18.5 kcal·min<sup>-1</sup>) compared to backhands (16.8 kcal·min<sup>-1</sup>) for flat, but not topspin, strikes. While the number of forehands and back- hands was kept similar during TEST, the selected ball speed (mean: 86 km·h<sup>-1</sup>) corresponds well to what has already been recorded during tennis drills where players were instructed to hit balls with lift [13]. While the consistency in speed and length of balls thrown by a tennis coach is questionable even for experienced coaches [23], the use of an accurate and reliable throwing machine was a strong methodological point to standardize our experimental conditions. Unlike Fargeas-Gluck and Leger [23], we believe that the determination of the running speed obtained from TEST is not a discriminating criterion in that energy expenditure is related to the level of engagement in strikes. During MSST, directional changes (180°) after 20-m shuttle runs are likely more intense than during TEST after shorter displacements ranging between 4 and 8 m. Because it is unlikely that players can maintain elevated strokes efficiency during several incremental steps using long exercise stages (> 1 min), especially in the absence of intervening recovery periods, TEST resembles more a tennis-specific procedure. During TEST, the duration of stages was set to 1 min interspersed by 30-s recovery periods. Because it is commonly thought that it would allow a more reliable determination of ventilatory and lactate thresholds



**Fig 3. Relation of players' ranking (1 to 27) with maximal oxygen uptake ( $\dot{V}O_{2max}$ , A), and oxygen uptake at the respiratory compensation point ( $\dot{V}O_{2RCP}$ , B). Dotted and plain lines represent TEST and MSST, respectively.**

doi:10.1371/journal.pone.0152389.g003

[5], stage durations of 2–3 min and a continuous mode of exercise have often been used in available test procedures [9,12], Nonetheless, Balmer et al. [24] showed that the maximum power determined by one minute increments in load are also highly reliable [24]. Such stage durations have been adopted in other incremental tennis-specific procedures (NAV TEN, [23]) and Hit & Turn Tennis Test [10], while even shorter stage durations have been used elsewhere [14]. Moreover, relatively short protocols (< 20 min), as used here, allow reliable determination of  $\dot{V}O_{2max}$  with 1-min stages [25]. Some previous studies have shown that hitting balls during specific aerobic training may have deleterious effects on forehand and backhand technique in teenage developing players [26,27]. At elite level, the technical skills are paramount and have to be trained on a systematic basis, which also include aerobic type sessions. For this purpose, TEST is of high practical interest.

### Submaximal loads

When designing an incremental test procedure, it is important that the first few stages are not too demanding physiologically in order not to overtax the anaerobic process [28]. Observed

correlations for physiological parameters between the two tests and the progressive increases in physiological load are therefore important. At RCP, we found higher  $\dot{V}O_2$  values for TEST compared to MSST. It underlines that during a specific activity, players might tolerate higher metabolic stress before activating the RCP. This may relate to the fact that players probably felt more comfortable performing on-court movements (i.e., displacements with specific footwork and ball hitting) than during a shuttle running, including sharper (and potentially more demanding) directional changes and limited upper body involvement. In support, performance, physiological and perceptual responses during repeated sprints with changes of direction are angle-dependent [29]. Interestingly, players with higher aerobic fitness compete at relatively lower exercise intensities [30]. Indeed, Baiget et al. [30] observed that players during competition scenarios spent more than 75% of the time in their low-intensity zone (under first ventilatory threshold), with less than 25% of the time spent at moderate-to-high intensities (between first and second ventilatory threshold). Evaluating specific aerobic fitness including elements of the game is therefore useful as it may determine the metabolic intensity that players can sustain throughout a game.

### Maximal loads

It is known that incremental tests lasting between 5 and 26 minutes are relevant for eliciting valid  $\dot{V}O_{2\max}$  values [31] and that relatively short protocols (< 20 min) with 1-min stages, as used here, also allow reliable  $\dot{V}O_{2\max}$  determination [25]. During TEST, all participants fulfilled the criteria of plateau in  $\dot{V}O_2$  with the majority of players also satisfying other criteria for maximal efforts, indicating that they were effectively exhausted by this new test procedure. Measuring  $\dot{V}O_{2\max}$  using TEST is relevant and may be used to prescribe aerobic exercise in a context more appropriate to game play than MSST. In line with previous tennis field-tests literature (The Hit & Turn Tennis Test) [10],  $\dot{V}O_{2\max}$  values reached on both tests were higher in males compared to females. Comparable values of other physiological variables and blood lactate concentration reached at exhaustion between the two tests further reinforce the usefulness of TEST in elite players.

Our findings, however, differ from Girard et al [11] and Smekal et al. [12]. On the one hand, Girard et al. [11] postulated that  $\dot{V}O_{2\max}$  values derived from laboratory testing (treadmill) may not be relevant for accurately estimating aerobic fitness in tennis players since  $\dot{V}O_{2\max}$  values were significantly lower on a treadmill vs. field test ( $58.9 \pm 5.3$  vs.  $63.8 \pm 5.7$  mL<sup>-1</sup>.min.kg<sup>-1</sup>). On the other hand, Smekal et al. [12] found higher  $\dot{V}O_{2\max}$  values with treadmill ( $58.3 \pm 4.3$  vs.  $52.4 \pm 3.7$  mL<sup>-1</sup>.min.kg<sup>-1</sup>) compared to on-court incremental tests. Discrepancies between our results and above findings may well relate to the details of the various tests and to the characteristics of tested players (i.e., level, age, gender). Furthermore, while TEST was compared to MSST in our study, previously developed test procedures have been compared with treadmill protocols that are in nature not specific to tennis (no directional changes or specific upper limbs involvement).

If possessing a high  $\dot{V}O_{2\max}$  is certainly not a discriminating factor for tennis performance as opposed to continuous aerobic activities (i.e., running, cycling), Bergeron et al. [32] indicated that players with a well-developed  $\dot{V}O_{2\max}$  would better sustain cardiovascular load and improve their recovery between points. In support, a strong inverse relationship between  $\dot{V}O_{2\max}$  and ATP entry ranking over time in a professional tennis player has been reported [33]. That said, Kovacs [34] postulated that for a top player, it is important to have a  $\dot{V}O_{2\max} > 50$  mL.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup> for women et 55 mL.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup> for men but that higher  $\dot{V}O_{2\max} (> 65$  mL.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>) does not further improve on-court performance against a  $\dot{V}O_{2\max}$  of ~55–60 mL.

$\text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ . This is reflected here where the best French junior players displayed averaged  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  values of  $56.5 \pm 5.6 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ . This is because performance in tennis is largely dependent on the technical, tactical and motor control/coordination aspects.

### Relationships of physiological response and test performance with competitive ranking

There was no correlation between the ranking of players and TEST duration ( $r = -0.06$ ), unlike in the study by Girard et al. [15] who did report a strong correlation ( $r = -0.96$ ) for elite players tested on a squash specific graded test. Compared to Girard et al. [15], our population sample was larger ( $n = 7$  vs. 27 participants) with also a more homogeneous sample of players, so that any significant relationship would be more difficult to distinguish. Furthermore, while a significant relationship between MSST duration and competitive ranking ( $r = -0.46$ ,  $p < 0.05$ ) has been observed, the lack of significant relationship for TEST may be because of the involvement with stroke hitting. This highly individual characteristic may lead to variable energy cost depending on players' game style and technique.

In our study, the moderate correlations of competitive ranking with  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  ( $r = -0.55$ ) and  $\dot{V}O_2$  at RCP ( $r = -0.47$ ), while rather similar relationships also occurred for MSST ( $r = -0.41$  and  $r = -0.38$ ), reinforce the interest of implementing TEST. In partial agreement with these findings, Baiget et al. [9] indicated that large part of the variability in the 38 competitive players that they have tested on a relatively similar incremental test could be explained by time to exhaustion and physiological parameters (RCP and maximal load). However, in the present study and in the one by Baiget et al. [9], correlations were only moderate, which reflect the complexity of tennis performance depending on a mixture of factors. It would be useful in future studies to relate physiological variables derived from TEST with indices of match intensity or fatigue resistance.

### Practical implications

Coaches may sometimes be reluctant using new technologies, as they believe it may negatively influence performance of their players (extra psycho-physiological stress). In this instance, observation of consistent performance and associated physiological variables when carrying or not a portable gas analyzer during on-court testing is encouraging [9]; wearing a mask may even induce an extra motivation (i.e Hawthorne effect) [35]. That said, TEST can also be practised without wearing a gas analyser to evaluate the ability of players to work in a fatigued state from the knowledge of target intensities (i.e., a given stage or the BF corresponding to players' RCP) to focus on technique stabilization. Hence, recent publications [13,36–39] highlight the importance of an integrated physical work on the tennis court, by monitoring physiological responses during the completion of specific on-court drills.

TEST can also be used to ascertain the effects of ergogenic aids or of a training intervention. Interestingly, Fernandez-Fernandez et al. [37] found a significant increase in  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  after tennis players both followed high-intensity interval training and repeated sprint training modalities, yet a treadmill test was implemented. In order to improve test specificity, TEST could be used, for instance to assess the effects of innovative training methods such as repeated sprinting in hypoxia [40] likely to maximize aerobic fitness in tennis players compared to similar training at sea level.

Adopting an intermittent exercise pattern is an important methodological difference with existing tests [9,12]. First, 30-s rest periods between stages are relatively close to between-points recoveries during official competitions ( $\sim 20$  s), potentially allowing a window to

blood lactate concentration. Second, the technical quality of the stroke is paramount to reach the highest level and a test allowing actual ball hitting is probably of higher interest for coaches. Hence, standardized evaluations of ball velocity/accuracy under various fatigue conditions are made possible.

## Conclusion

Building on recent efforts made to develop field tests in tennis, we introduce here a Test to Exhaustion Specific to Tennis (the so-called TEST) including elements of game play (i.e., specific footwork, ball hitting, intermittent activity) and compared performance and physiological responses to a widely used field procedure (MSST). At submaximal intensity (RCP)  $\dot{V}O_2$ , but not  $\dot{V}E$  and heart rate, values were higher for TEST compared to MSST. However, load increment and physiological responses at maximal load were similar between the two tests. Results also indicate that  $\dot{V}O_2$  values both at submaximal and maximal loads reached during TEST and MSST are moderate predictors of players competitive ranking. Test–retest are still needed to guarantee the excellent reproducibility of performance and physiological responses. In doing so, testing players of various standards or age groups using TEST would allow to relate players to their peers (chronological and biological age) through the determination of age-group percentiles, for instance as done for the Hit & Run Tennis Test (Ferrauti et al., 2011). In order to identify players whose  $\dot{V}O_{2max}$  is sufficiently high in their age group and meeting the physiological demands of senior match play, building normative tables for different groups may also be informative.

## Acknowledgments

The authors thank all the players and the coaches for their enthusiastic participation in this project.

## Author Contributions

Conceived and designed the experiments: CB GPM LS. Performed the experiments: CB LS. Analyzed the data: CB OG GPM LS. Contributed reagents/materials/analysis tools: CB OG GPM LS. Wrote the paper: CB OG GPM LS.

## References

1. Fernandez-Fernandez J, Ulbricht A, Ferrauti A (2014) Fitness testing of tennis players: how valuable is it? *Br J Sports Med* 48 Suppl 1: i22–31. doi: [10.1136/bjsports-2013-093152](https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-093152) PMID: [24668375](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24668375/)
2. Lees A (2003) Science and the major racket sports: a review. *J Sports Sci* 21: 707–732. PMID: [14579868](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14579868/)
3. Girard O, Lattier G, Maffiuletti NA, Micallef JP, Millet GP (2008) Neuromuscular fatigue during a prolonged intermittent exercise: Application to tennis. *J Electromyogr Kinesiol* 18: 1038–1046. PMID: [17611122](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17611122/)
4. Foster C, Cotter A (2006) Blood lactate, respiratory, heart rate markers on the capacity for sustained exercise. In: kinetics H, editor. *Physiological assessment of human fitness*. 2nd ed. Champaign, IL. pp. 63–76.
5. Bentley DJ, Newell J, Bishop D (2007) Incremental exercise test design and analysis: implications for performance diagnostics in endurance athletes. *Sports Med* 37: 575–586. PMID: [17595153](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17595153/)
6. Buchheit M (2008) The 30–15 intermittent fitness test: accuracy for individualizing interval training of young intermittent sport players. *J Strength Cond Res* 22: 365–374. doi: [10.1519/JSC.0b013e3181635b2e](https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181635b2e) PMID: [18550949](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18550949/)
7. Leger L, Gadoury C (1989) Validity of the 20 m shuttle run test with 1 min stages to predict  $\dot{V}O_{2max}$  in adults. *Can J Sport Sci* 14: 21–26. PMID: [2924218](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2924218/)



8. StClairGibson A, Broomhead S, Lambert MI, Hawley JA (1998) Prediction of maximal oxygen uptake from a 20-m shuttle run as measured directly in runners and squash players. *J Sports Sci* 16: 331–335. PMID: [9663957](#)
9. Baiget E, Fernandez-Fernandez J, Iglesias X, Vallejo L, Rodriguez FA (2014) On-court endurance and performance testing in competitive male tennis players. *J Strength Cond Res* 28: 256–264. doi: [10.1519/JSC.0b013e3182955dad](#) PMID: [23588482](#)
10. Ferrauti A, Kinner V, Fernandez-Fernandez J (2011) The Hit & Turn Tennis Test: an acoustically controlled endurance test for tennis players. *J Sports Sci* 29: 485–494. doi: [10.1080/02640414.2010.539247](#) PMID: [21294033](#)
11. Girard O, Chevalier R, Leveque F, Micallef JP, Millet GP (2006) Specific incremental field test for aero- bic fitness in tennis. *Br J Sports Med* 40: 791–796. PMID: [16855066](#)
12. Smekal G, Pokan R, von Duvillard SP, Baron R, Tschan H, Bachl N (2000) Comparison of laboratory and "on-court" endurance testing in tennis. *Int J Sports Med* 21: 242–249. PMID: [10853694](#)
13. Fernandez-Fernandez J, Kinner V, Ferrauti A (2010) The physiological demands of hitting and running in tennis on different surfaces. *J Strength Cond Res* 24: 3255–3264. doi: [10.1519/JSC.0b013e3181e8745f](#) PMID: [21088546](#)
14. Bekraoui N, Fargeas-Gluck MA, Leger L (2012) Oxygen uptake and heart rate response of 6 standardized tennis drills. *Appl Physiol Nutr Metab* 37: 982–989. doi: [10.1139/h2012-082](#) PMID: [22871149](#)
15. Girard O, Sciberras P, Habrard M, Hot P, Chevalier R, Millet GP (2005) Specific incremental test in elite squash players. *Br J Sports Med* 39: 921–926. PMID: [16306500](#)
16. Harriss DJ, Atkinson G (2013) Ethical standards in sport and exercise science research: 2014 update. *Int J Sports Med* 34: 1025–1028. doi: [10.1055/s-0033-1358756](#) PMID: [24293054](#)
17. Leger LA, Mercier D, Gadoury C, Lambert J (1988) The multistage 20 metre shuttle run test for aerobic fitness. *J Sports Sci* 6: 93–101. PMID: [3184250](#)
18. American College of Sports Medicine (2006) ACM's guidelines for exercise testing and prescription; Lippincott, editor. Philadelphia, PA.
19. Pyne DB, Boston T, Martin DT, Logan A (2000) Evaluation of the Lactate Pro blood lactate analyser. *Eur J Appl Physiol* 82: 112–116. PMID: [10879451](#)
20. Girard O, Micallef JP, Millet GP (2005) Lower-limb activity during the power serve in tennis: effects of performance level. *Med Sci Sports Exerc* 37: 1021–1029. PMID: [15947729](#)
21. Wasserman K HJ, SUE DY, Stringer WW, Whipp BJ. (2005) Principles of exercise testing and Interpretation: Including Pathophysiology and Clinical Applications; Wilkins LW, editor. Philadelphia, PA.
22. Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, Hanin J (2009) Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med Sci Sports Exerc* 41: 3–13. doi: [10.1249/MSS.0b013e31818cb278](#) PMID: [19092709](#)
23. Fargeas-Gluck MA, Leger LA (2012) Comparison of two aerobic field tests in young tennis players. *J Strength Cond Res* 26: 3036–3042. doi: [10.1519/JSC.0b013e3182472fc3](#) PMID: [22207255](#)
24. Balmer J, Davison RC, Bird SR (2000) Reliability of an air-braked ergometer to record peak power during a maximal cycling test. *Med Sci Sports Exerc* 32: 1790–1793. PMID: [11039654](#)
25. Pierce SJ, Hahn AG, Davie A, Lawton EW (1999) Prolonged incremental tests do not necessarily compromise  $\dot{V}O_{2max}$  in well-trained athletes. *J Sci Med Sport* 2: 356–363. PMID: [10710013](#)
26. Pialoux V, Genevois C, Capoen A, Forbes SC, Thomas J, Rogowski L (2015) Playing vs. nonplaying aerobic training in tennis: physiological and performance outcomes. *PLoS One* 10: e0122718. doi: [10.1371/journal.pone.0122718](#) PMID: [25816346](#)
27. Guillot A, Di Rienzo F, Pialoux V, Simon G, Skinner S, Rogowski L (2015) Implementation of Motor Imagery during Specific Aerobic Training Session in Young Tennis Players. *PLoS One* 10: e0143331. doi: [10.1371/journal.pone.0143331](#) PMID: [26580804](#)
28. Vallier J, Bigard A, Carré F, Eclache J, Mercier J (2000) Détermination des seuils lactiques et ventilatoires. Position de la Société française de médecine du sport. *Science & Sports* 15: 133–140.
29. Buchheit M, Haydar B, Ahmaidi S (2012) Repeated sprints with directional changes: do angles matter? *J Sports Sci* 30: 555–562. doi: [10.1080/02640414.2012.658079](#) PMID: [22335343](#)
30. Baiget E, Fernandez-Fernandez J, Iglesias X, Rodriguez FA (2015) Tennis Play Intensity Distribution and Relation with Aerobic Fitness in Competitive Players. *PLoS One* 10: e0131304. doi: [10.1371/journal.pone.0131304](#) PMID: [26098638](#)
31. Midgley AW, Bentley DJ, Luttikholt H, McNaughton LR, Millet GP (2008) Challenging a dogma of exercise physiology: does an incremental exercise test for valid  $\dot{V}O_{2max}$  determination really need to last between 8 and 12 minutes? *Sports Med* 38: 441–447. PMID: [18489192](#)

32. Bergeron MF, Maresh CM, Kraemer WJ, Abraham A, Conroy B, et al. (1991) Tennis: a physiological profile during match play. *Int J Sports Med* 12: 474–479. PMID: [1752714](#)
33. Banzer W, Thiel C, Rosenhagen A, Vogt L (2008) Tennis ranking related to exercise capacity. *Br J Sports Med* 42: 152–154; discussion 154. doi: [10.1136/bjism.2007.036798](#) PMID: [18256303](#)
34. Kovacs MS (2007) Tennis physiology: training the competitive athlete. *Sports Med* 37: 189–198. PMID: [17326695](#)
35. Fernald DH, Coombs L, DeAllemaume L, West D, Parnes B (2012) An assessment of the Hawthorne Effect in practice-based research. *J Am Board Fam Med* 25: 83–86. doi: [10.3122/jabfm.2012.01.110019](#) PMID: [22218628](#)
36. Fernandez-Fernandez J, Sanz-Rivas D, Sanchez-Munoz C, de la Aleja Tellez JG, Buchheit M, Mendez-Villanueva A (2011) Physiological Responses to On-Court vs Running Interval Training in Competitive Tennis Players. *J Sports Sci Med* 10: 540–545. PMID: [24150630](#)
37. Fernandez-Fernandez J, Zimek R, Wiewelhoe T, Ferrauti A (2012) High-intensity interval training vs. repeated-sprint training in tennis. *J Strength Cond Res* 26: 53–62. doi: [10.1519/JSC.0b013e318220b4ff](#) PMID: [21904233](#)
38. Reid M, Schneiker K (2008) Strength and conditioning in tennis: current research and practice. *J Sci Med Sport* 11: 248–256. PMID: [17597004](#)
39. Reid M, Duffield R, Dawson B, Baker J, Crespo M (2008) Quantification of the physiological and performance characteristics of on-court tennis drills. *Br J Sports Med* 42: 146–151; discussion 151. PMID: [17681984](#)
40. Faiss R, Leger B, Vesin JM, Fournier PE, Eggel Y, Deriaz O, et al. (2013) Significant molecular and systemic adaptations after repeated sprint training in hypoxia. *PLoS One* 8: e56522. doi: [10.1371/journal.pone.0056522](#) PMID: [23437154](#)

## ***Chapitre 8:***

### ***Article 3- Test d'effort spécifique tennis (TEST): Etude de cas d'un joueur élite.***

**Article 3- Stress test specific to tennis (Test): Case study of an elite player.**

Brechbuhl C, Girard O, Millet GP, Schmitt L. ITF Coaching & Sport Science Review (2016); (70):26-9

# Stress test specific to tennis (Test): Case study of an elite player

Cyril Brechbuhl (FRA), Olivier Girard (FRA), Grégoire Millet(FRA)  
and Laurent Schmitt (FRA)

ITF Coaching and Sport Science Review 2016; 70 (24): 26 - 29

## ABSTRACT

Although assessment of the technical, physical and physiological qualities required for performance optimisation is complex in tennis, it is nonetheless essential to training planning. While physical goals are often dissociated from technical ones, we argue that a recently validated stress test specific to tennis, known as “TEST” (Brechbuhl, Girard, Millet, & Schmitt, 2016), allows to combine both effectively. Differences in forehand and backhand efficiency may occur as a result of fatigue under standardized conditions, thus minimising emotional and tactical effects. The aim of the present case study is to offer a practical reading of TEST in an elite player.

Article received: 30 September 2016

Article accepted: 10 October 2016

**Key words:** Incremental test, ball hitting, ball speed, training

**Corresponding author:** Cyril.brechbuhl@fft.fr

## INTRODUCTION

Technological and scientific advances have made it possible to gradually progress towards field testing that is more specific and closer to performance specificities. Two aspects seem to favour specific tests (on the court, using real or simulated ball-hitting action) over semi-specific tests (close to the activity pattern in terms of work and recovery times) (“Yo-Yo IR2” [Bangsbo, Iaia, & Krstrup, 2008]; “30-15 Intermittent Fitness Test” [Buchheit, 2008]; “Shuttle Run Test” [Leger & Lambert, 1982]): (1) the use of the tennis court dimensions, and (2) the combination of specific footwork and upper body movements (i.e. simulating or executing strokes).

In regards to specific tests, some authors have used tennis-specific movements, but with no actual hitting of the ball (Ferrauti, Kinner, & Fernandez-Fernandez, 2011; Girard, Chevalier, Leveque, Micallief, & Millet, 2006), while others have integrated real ball-hitting action with assessment of hitting accuracy (Baiget, Fernandez-Fernandez, Iglesias, Vallejo, & Rodriguez, 2014; Davey, Thorpe, & Williams, 2002; Smekal et al., 2000) or without any technical assessment (Fargeas-Gluck & Leger, 2012). There is a growing desire to relate parameters of technical performance (stroke accuracy and/or velocity) to physiological changes (blood lactate concentration [la], heart rate (HR), oxygen uptake (VO<sub>2</sub>)) under standardised conditions (Davey et al., 2002; Smekal et al., 2000; Vergauwen, Spaepen, Lefevre, & Hespel, 1998).

By comparing physiological responses between a field-based procedure and a discontinuous treadmill test, Girard et al. (2006) highlighted that laboratory tests underestimate maximal oxygen uptake (VO<sub>2</sub>max) values, while the main cardiorespiratory variables (HR, VO<sub>2</sub>) measured at submaximal intensities did not differ (Girard et al., 2006). We prefer tests that integrate real ball-hitting action because upper body contribution, which has a significant influence on energy expenditure as reported in the literature (Fernandez-Fernandez, Kinner, & Ferrauti, 2010), must be taken into account. To date, no comparison of physiological influences between simulated and actual strokes (without distinguishing forehand and backhand strokes) has been published in the literature.

From a study case, we will see how TEST (Brechbuhl, Girard, Millet, & Schmitt, 2016) allows to have a physiological approach while ensuring that technical execution meets the requirements of high performance.

## EQUIPMENT AND METHOD

### Player

The subject is an elite male player, aged 19 at the time of the test. After having been one of the most promising junior players, he continued to perform well on the tour, reaching second weeks of Grand Slams and winning ATP titles.

## Test Protocol

TEST procedure consists of hitting balls thrown at a mean velocity of 86 km.h<sup>-1</sup> by a Hightof<sup>®</sup> ball machine, alternating crosscourt forehand and backhand strokes (Brechbuhl, Millet, & Schmitt, 2016) (Figure 1). After a 2-minute “habituation” phase (ball frequency of 16 shots.min<sup>-1</sup>), the first stage consists of a ball frequency of 10 shots.min<sup>-1</sup>, which is then increased by 2 shots.min<sup>-1</sup> every minute until the stage corresponding to 22 shots.min<sup>-1</sup> is reached. From there, increment in ball frequency is set at +1 shot.min<sup>-1</sup> until exhaustion. Between each stage, a 30-second (passive) recovery break is implemented. TEST allows a simultaneous evaluation of physiological and technical variables. Ball velocity (using a radar) and accuracy values are recorded for each stage completed. Player is encouraged to find the right balance between ball speed and accuracy. Combined, velocity and accuracy parameters give an insight on technical performance (PerfTennis) (Figure 3B).

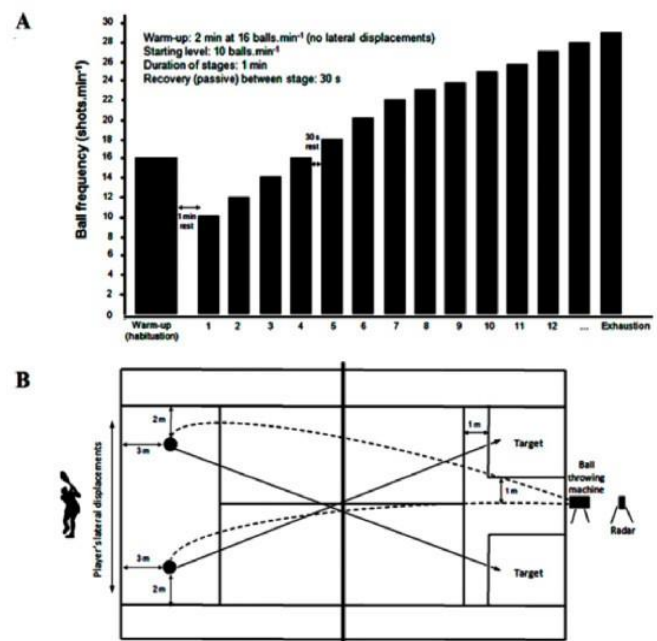


Figure 1 – TEST design (A) and schematic setting (B) (Brechbuhl, Girard, et al., 2016). GAS ANALYSIS SYSTEM

We chose the Cortex MetaMax 3B® analyser because of its ease of use, light weight and compact size. It weighs 570 grams and allows to measure HR, VO<sub>2</sub>, carbon dioxide production (VCO<sub>2</sub>) and ventilation (VE). Ventilatory threshold (VT1 and VT2) detection was done by analysing the points of change in slope (breaks in linearity) of ventilatory parameters (Wasserman, 2005).

Furthermore, for the player's optimal comfort, we used a neoprene mask which does not obstruct vision. In order to hold the MetaMax 3B® system in place during the player's movements, we used a breathable, comfortable Surgifix elastic net bandage (Picture 1).



Picture 1 – Player's equipment (gas analysis system) during TEST.

### LACTATE CONCENTRATION MEASUREMENT

Capillary blood samples were taken from fingertip and analysed for lactate concentrations as per current guidelines (Dassonville et al., 1998). Samples were taken on the non-dominant hand to preserve the quality of the player's racket grip. Accordingly, during TEST, measurement was done every two stages using the Lactate Pro II analyser by Arkray®.

### BALL VELOCITY AND ACCURACY MEASUREMENT

Groundstroke efficiency was determined from ball velocity (km.h<sup>-1</sup>) measured using the Solstice 2 radar (Hightof®®, France), and accuracy measured by a coach who recorded data on a touch screen. Groundstroke accuracy value was derived from the percentage (%) of balls landing in the target zone defined in Figure 1.

### RESULTS

Data on physiology and technical performance relative to increasing effort are shown in tables and figures below.

Zone d'intensité	Palier	n balles.min <sup>-1</sup>	FC (bpm)	Lactates (mmol.l <sup>-1</sup> )	VO <sub>2</sub> (ml.min <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> )	VCO <sub>2</sub> (ml.min <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> )	VE (l.min <sup>-1</sup> )
Zone 1	1	10	131		40.2	36.6	68
	2	12	140	1	41.5	39.0	74
	3	14	154		43.9	42.7	79
	4	16	159	1.2	45.1	45.7	84
	5	18	165		47.6	48.8	87
	6	20	171	1.4	50.4	51.2	95
Zone 2	7	22	175		53.2	53.3	98
	8	23	180	2.1	55.6	57.1	104
	9	24	183		57.4	61.2	115
Zone 3	10	25	184	4.2	59.6	65.2	125
	11	26	188		60.5	68.1	133
	12	27	189		61.5	70.2	145
	13	28	191	11.8	62.2	74.2	160

Table 1 – Physiological responses during the completion of TEST in an elite player. HR: heart rate; VO<sub>2</sub>: oxygen uptake; VCO<sub>2</sub>: carbon dioxide production; VE: ventilation. Height: 185 cm; Weight: 82 kg.

**Zone 1:** Pure aerobic zone, below LT1 (first lactate threshold) and VT1 (first ventilatory threshold).

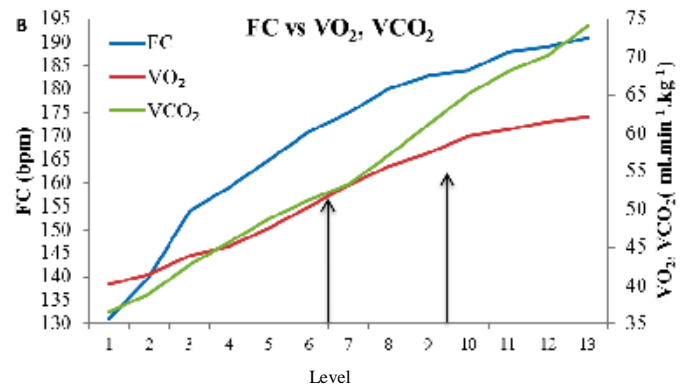
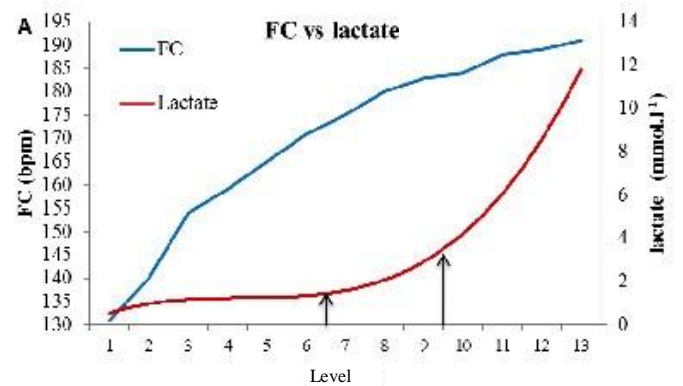
Aerobic endurance training: increased vascularisation of muscles, increase in the number and size of mitochondria, increase in the amount of aerobic enzymes (Krebs cycle) and beta-oxidation enzymes.

**Zone 2:** Zone between the first and second lactate thresholds (or below VT2); zone of aerobic development through increased use of shuttle systems of transport of hydrogen ions (NADH<sub>2</sub>); mixed zone of lipid and carbohydrate use.

**Zone 3:** Above the second lactate threshold and VT2; zone of elevated blood lactate levels; decrease in tennis performance level as a result of muscle acidosis and hyperventilation. Maximal aerobic power training. Increased cardiopulmonary capacity, increased transport of oxygen, increased glycolytic enzymes (PFK and LDH during conversion of lactate into pyruvate), improved muscle buffering capacity, increased muscle glycogen stores.

palier	VO <sub>2</sub> ml.min <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup>	Lactate mmol.l <sup>-1</sup>	Vitesse Coup Droit km.h <sup>-1</sup>	Vitesse Revers km.h <sup>-1</sup>	Précision Coup Droit % in zone	Précision Revers % in zone	Perfennis Coup Droit (% x V (1))	Perfennis Revers (% x V Rev)
1	40.2	1	122	113.4	50	40	61	45.4
2	41.5	1	132	113.6	66	42	87	47.7
3	43.9	1.1	126	120.0	78	64	98	76.8
4	45.1	1.2	133	123.5	75	69	99	85.2
5	47.6	1.3	128	119.2	66	60	84	71.5
6	50.4	1.4	135	123.8	80	60	108	74.3
7	53.2	1.6	131	117.7	82	55	108	64.7
8	55.6	2.1	125	123.2	65	57	81	70.2
9	57.4	3	122	117.0	68	54	80	63.2
10	59.6	4.2	125	110.4	60	60	75	66.2
11	60.5	5.7	123	117.9	59	61	73	71.9
12	61.5	7.9	126	112.6	65	55	82	61.9
13	62.2	11.8	115	104.3	60	50	69	52.2

Table 2 – Parameters of technical performance as measured during TEST in an elite player.



Figures 1A and 1B – Changes in heart rate (HR) in relation to lactate concentration (A) and oxygen uptake (VO<sub>2</sub>) and carbon dioxide production (VCO<sub>2</sub>) (B) during completion of TEST. Vertical arrows indicate VT1 and VT2.

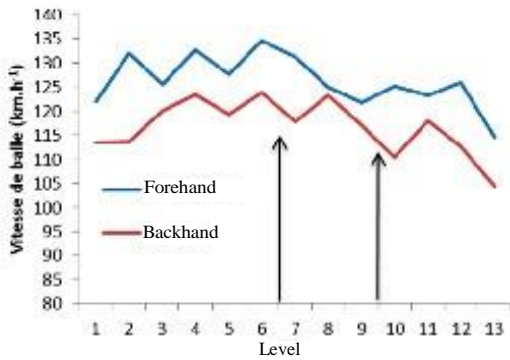


Figure 2 – Forehand and backhand ball velocity during completion of TEST. Vertical arrows indicate VT1 and VT2.

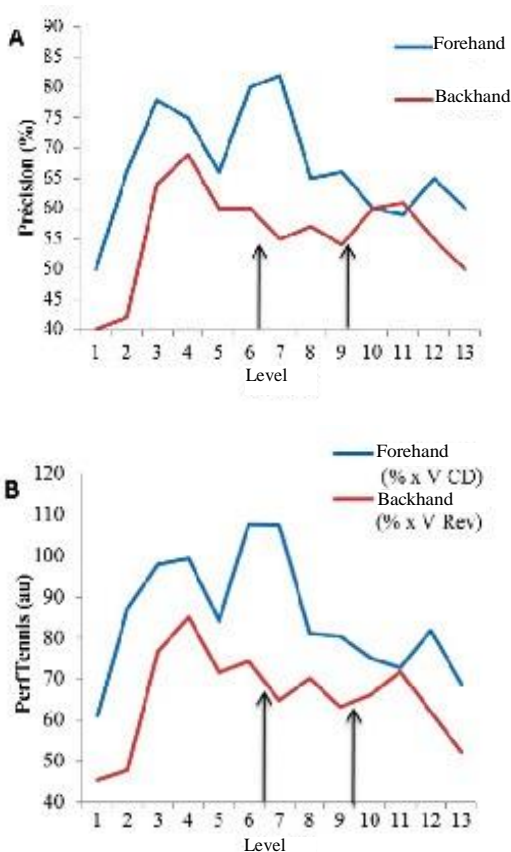


Figure 3A and 3B – Accuracy levels and technical performance (PerfTennis) during TEST.

## DISCUSSION

The growth of training methodologies in tennis forces us to think about ways to optimise time and resources used. How can we make strength training techniques coexist with those designed for the development of speed, endurance and technical skills? Our aim is to suggest an approach which combines physiological capacity development and technical skill training based on data provided by TEST.

A “polarised” approach to training, whereby approximately 75% of total training volume is performed at low aerobic intensities (Zone 1), and 10-15% is performed at high or very high intensities (Zone 3), has been suggested as an optimal training intensity distribution for elite athletes who perform intense exercise events (Laursen, 2010). Clearly, such a distribution can hardly be applied to tennis considering the routines and exercises that we typically find in our sport, but this proposal serves as a basis for our discussion. In a recent study on tennis players’ energy responses during competition (Baiget, Fernandez-Fernandez, Iglesias, & Rodriguez, 2015),

Baiget et al. (2015) found that players spend 77% ( $\pm 25\%$ ) of playing time in the low intensity zone (Zone 1), 20% ( $\pm 21\%$ ) in the moderate intensity zone (Zone 2), and 3% ( $\pm 5\%$ ) in Zone 3. TEST data allow for this organisation of the workload.

Training effects on general physiological state must contribute to balancing the influences on athletes’ neurovegetative activity (Schmitt et al., 2015). It has become evident that most training situations that incorporate repetitions of ball-hitting drills with a high level of commitment bring players close to VT2 (Reid, Duffield, Dawson, Baker, & Crespo, 2008). Therefore, we encourage coaches to reconsider predominantly technical training sessions with a focus on a limited number of strokes that does not exceed 7 s, and 20-s recovery periods between repetitions. This way, glycogen stores – particularly used at such intensity levels – would be preserved and it would allow for repetitions of ball-hitting drills at VT1 (i.e. Stage 6 in the studied case, which corresponds to an intensity level of 20 shots.min<sup>-1</sup>). Similarly, analysis of activity under competitive conditions (Baiget et al., 2015) supports the assumption that forms of points played with serve should aim to maintain players close to Zone 1 with less deleterious effects on fatigue.

From TEST, goals focused primarily on technique (Zones 1 and 2) or energy (Zone 3) can be pursued, with a focus on quality of stroke production and feedback on velocity and accuracy (Table 2). For Zone 1, for example, the goal would be to keep the session going as long as possible at Stage 6, which corresponds to VT1 (i.e. 81% VO<sub>2</sub>max or 89% HRmax for the player in our study), with 2 or 3 series of 5 to 10 minutes of continuous activity and 3-minute passive recovery periods between series. Alternatively, if the goal is Zone 3, shorter hitting intervals (15 s to 1 min), interspersed with passive recovery periods (15-30 s), should be preferred. In all cases, it is advisable to avoid falling below a 50% rate of balls in the defined target zone for expert players; and a 40% rate for less experienced players (Lyons, Al-Nakeeb, Hankey, & Nevill, 2013) during TEST. In the present study case, we observed a somewhat stable ball velocity during the test. In contrast, changes in accuracy were quite significant for forehand strokes: first between Stages 4 and 5 (-12%), and then more noticeably between Stages 7 and 8 (-20 %). In both cases, the player had not yet reached VT2. Therefore, it is important to put the emphasis on forehand accuracy when working at Zones 1-2. It should also be noted that values attained by our player compare favourably with those published elsewhere. Indeed, at the lowest point of the start of the decline, we still observed a 65% accuracy rate in forehand (Stage 8), still 15% above the average values found by Lyons (Lyons et al., 2013) for expert players, even though our target zones were smaller. Nevertheless, in the interest of progress, a work plan can clearly be identified.

## CONCLUSION

Considering the complexity of performance and trainable performance factors, training themes in tennis appear to be too frequently treated analytically. Through TEST and its applications, our aim is to suggest a global approach designed to avoid redundant physiological demands. Without underestimating the diversity of practices, this approach may contribute to a more efficient planning of training contents and a better management of fatigue.

## REFERENCES

- Baiget, E., Fernandez-Fernandez, J., Iglesias, X., & Rodriguez, F. A. (2015). Tennis Play Intensity Distribution and Relation with Aerobic Fitness in Competitive Players. [Research Support, Non-U.S. Gov’t]. PLoS One, 10(6), e0131304. doi: 10.1371/journal.pone.0131304
- Baiget, E., Fernandez-Fernandez, J., Iglesias, X., Vallejo, L., & Rodriguez, F. A. (2014). On-court endurance and performance testing in competitive male tennis players. J Strength Cond Res, 28(1), 256-264. doi: 10.1519/JSC.0b0124th Year, Issue 70, December 2016 3e3182955dad

- Bangsbo, J., Iaia, F. M., & Krstrup, P. (2008). The Yo-Yo intermittent recovery test: a useful tool for evaluation of physical performance in intermittent sports. [Research Support, Non-U.S. Gov't Review]. *Sports Med*, 38(1), 37-51.
- Brechbuhl, C., Girard, O., Millet, G. P., & Schmitt, L. (2016). On the Use of a Test to Exhaustion Specific to Tennis (TEST) with Ball Hitting by Elite Players. *PLoS One*, 11(4), e0152389. doi: 10.1371/ journal.pone.0152389
- Brechbuhl, C., Millet, G., & Schmitt, L. (2016). Accuracy and Reliability of a New Tennis Ball Machine. *J Sports Sci Med*, 15(2), 263-267.
- Buchheit, M. (2008). The 30-15 intermittent fitness test: accuracy for individualizing interval training of young intermittent sport players. *J Strength Cond Res*, 22(2), 365-374. doi: 10.1519/ JSC.0b013e3181635b2e
- Dassonville, J., Beillot, J., Lessard, Y., Jan, J., Andre, A. M., Le Pourcelet, C., Rochcongar, P., Carre, F. (1998). Blood lactate concentrations during exercise: effect of sampling site and exercise mode. [Clinical Trial]. *J Sports Med Phys Fitness*, 38(1), 39-46.
- Davey, P. R., Thorpe, R. D., & Williams, C. (2002). Fatigue decreases skilled tennis performance. *J Sports Sci*, 20(4), 311-318. doi: 10.1080/026404102753576080
- Fargeas-Gluck, M. A., & Leger, L. A. (2012). Comparison of two aerobic field tests in young tennis players. [Comparative Study]. *J Strength Cond Res*, 26(11), 3036-3042. doi: 10.1519/ JSC.0b013e3182472fc3
- Fernandez-Fernandez, J., Kinner, V., & Ferrauti, A. (2010). The physiological demands of hitting and running in tennis on different surfaces. [Comparative Study Randomized Controlled Trial]. *J Strength Cond Res*, 24(12), 3255-3264. doi: 10.1519/ JSC.0b013e3181e8745f
- Ferrauti, A., Kinner, V., & Fernandez-Fernandez, J. (2011). The Hit & Turn Tennis Test: an acoustically controlled endurance test for tennis players. [Research Support, Non-U.S. Gov't Validation Studies]. *J Sports Sci*, 29(5), 485-494. doi: 10.1080/02640414.2010.539247
- Girard, O., Chevalier, R., Leveque, F., Micallef, J. P., & Millet, G. P. (2006). Specific incremental field test for aerobic fitness in tennis. [Comparative Study Randomized Controlled Trial]. *Br J Sports Med*, 40(9), 791-796. doi: 10.1136/bjism.2006.027680
- Laursen, P. B. (2010). Training for intense exercise performance: high-intensity or high-volume training? [Review]. *Scand J Med Sci Sports*, 20 Suppl 2, 1-10. doi: 10.1111/j.1600-0838.2010.01184.x
- Leger, L. A., & Lambert, J. (1982). A maximal multistage 20-m shuttle run test to predict VO2 max. [Comparative Study Research Support, Non-U.S. Gov't]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 49(1), 1-12.
- Lyons, M., Al-Nakeeb, Y., Hankey, J., & Nevill, A. (2013). The effect of moderate and high-intensity fatigue on groundstroke accuracy in expert and non-expert tennis players. *J Sports Sci Med*, 12(2), 298-308.
- Reid, M., Duffield, R., Dawson, B., Baker, J., & Crespo, M. (2008). Quantification of the physiological and performance characteristics of on-court tennis drills. [Research Support, Non-U.S. Gov't]. *Br J Sports Med*, 42(2), 146-151; discussion 151. doi: 10.1136/bjism.2007.036426
- Schmitt, L., Regnard, J., Parmentier, A. L., Mauny, F., Mourou, L., Coulmy, N., & Millet, G. P. (2015). Typology of "Fatigue" by Heart Rate Variability Analysis in Elite Nordic-skiers. *Int J Sports Med*, 36(12), 999-1007. doi: 10.1055/s-0035-1548885
- Smekal, G., Pokan, R., von Duvillard, S. P., Baron, R., Tschann, H., & Bachl, N. (2000). Comparison of laboratory and "on-court" endurance testing in tennis. [Comparative Study]. *Int J Sports Med*, 21(4), 242-249. doi: 10.1055/s-2000-310
- Vergauwen, L., Spaepen, A. J., Lefevre, J., & Hespel, P. (1998). Evaluation of stroke performance in tennis. [Research Support, Non-U.S. Gov't]. *Med Sci Sports Exerc*, 30(8), 1281-1288.
- Wasserman, K., Hansen, J., Sue DY, Stringer, WW., & Whipp BJ. (2005). Principles of exercise testing and Interpretation: Including Pathophysiology and Clinical Applications. Philadelphia, PA.

[RECOMMENDED ITF TENNIS ICOACH CONTENT \(CLICK BELOW\)](#)

**Tennis*i*Coach**



## ***Chapitre 9***

***Chapitre de livre (Ed ; Deboeck Université, in press) -***

***Evaluation et développement des ressources***

***physiologiques du joueur de tennis***

**Article 4- Evaluation et développement des ressources physiologiques du joueur de tennis (Chapitre).**

Olivier GIRARD, Cyril BRECHBUHL, Laurent SCHMITT, Grégoire P MILLET. Ed. De Boeck. (in press)

EVALUATION ET DEVELOPPEMENT DES RESSOURCES PHYSIOLOGIQUES  
DU JOUEUR DE TENNIS

-----

Olivier GIRARD, Cyril BRECHBUHL, Laurent SCHMITT, Grégoire P MILLET

## SOMMAIRE

### Introduction

#### 1. Evaluation de l'aptitude aérobie

##### 1.1. Tests en laboratoire

##### 1.2. Tests de terrain

##### 1.2.1. Tests semi-spécifiques

##### 1.2.2. Tests spécifiques

#### 2. Évaluation de l'aptitude anaérobie

##### 2.1. Tests en laboratoire

##### 2.2. Tests de terrain

#### 3. Méthodes de développement des qualités aérobie et anaérobie

##### 3.1. Généralités

##### 3.2. Exercices intermittents à haute intensité

##### 3.3. Sprints répétés

##### 3.4. L'entraînement en altitude comme approche innovante

#### 4. Recommandations pratiques

### Conclusion

## LISTE DES ABBREVIATIONS

Capacité à répéter des sprints (CRS)

Concentration sanguine en lactate ([La])

Consommation maximale d'oxygène ( $VO_{2max}$ )

Fédération Française de Tennis (FFT)

Fréquence cardiaque (FC)

High-intensity interval training (HIIT) ou Exercice intermittent à haute intensité

Répétition de sprints en hypoxie (RSH)

Seuils ventilatoires 1 et 2 (SV1 et SV2, respectivement)

Test to Exhaustion Specific to Tennis (TEST) ou Test maximal spécifique au tennis

## Introduction

Le succès au tennis dépend largement des qualités technico-tactiques du joueur mais requiert également une interaction complexe entre les qualités physiques (*c-à-d.* force, vitesse, coordination, souplesse, endurance, agilité) et les systèmes de fourniture d'énergie (aérobie et anaérobie) (Fernandez Fernandez et al. 2006). Afin de maximiser l'efficacité de l'entraînement physique du joueur de tennis, ses objectifs et contenus doivent être définis objectivement au regard de la charge de travail soutenue en match. L'analyse de la structure du jeu (*c-à-d.* durée des échanges, des matchs; ratio exercice : récupération), des réponses physiologiques (*p. ex.* fréquence cardiaque (FC) et concentration sanguine en lactate ([La]) et des principaux déterminants de la performance (cf. Chapitre 1) sont des éléments à considérer pour définir le programme d'entraînement et obtenir des adaptations spécifiques. Cette approche doit être individualisée, prenant en compte les caractéristiques propres de chaque joueur; une approche dont l'un des précurseurs en France est le Dr. Talbot (Talbot, 1990). Il est courant d'avoir recours à différents tests afin d'évaluer les qualités physiques d'un joueur. Cette objectivation du potentiel physique du joueur doit permettre, à partir de feedbacks objectifs, des ajustements du contenu (*c-à-d.* volume, intensité) de l'entraînement à plus ou moins long terme et un maintien de sa motivation en fixant des objectifs réalistes au regard de son état de forme.

Tout projet de développement du joueur à long terme implique une évaluation régulière (*c.-à-d.* au minimum 2 fois par an) de son niveau de condition physique, ce qui représente un aspect important de l'apport des sciences du sport dans la rationalisation de l'entraînement. La mise en place d'une batterie de tests doit inclure des tests qui répondent aux principes de validité, reproductibilité et objectivité. Celle-ci inclut à la fois des tests en laboratoire (niveau de standardisation élevé) et de terrain (conditions plus proches du jeu) utilisés de manière complémentaire pour détecter des talents, juger ponctuellement de l'efficacité d'une intervention ou de l'évolution des qualités du joueur sur plusieurs mois/années. De plus, le retour d'informations vers les entraîneurs et joueurs doit être rapide pour garder sa pertinence (Coutts, 2016). Si les tests en laboratoire (excellente reproductibilité) sont utilisés notamment dans les sports individuels pour évaluer les aptitudes physiques de base (*c-à-d.* seuils ventilatoires, consommation maximale d'oxygène ( $VO_{2max}$ ), économie de déplacement), les tests de terrain répondent mieux aux sollicitations des activités intermittentes comme le tennis. En effet, les systèmes de fourniture d'énergie, les groupes musculaires et les déplacements doivent être sollicités dans un contexte approprié au jeu, proche de celui de la compétition. Dans ce cadre, les données collectées pendant la compétition représentent des critères externes solides pour valider la pertinence de tests de terrain spécifique au tennis. Par ailleurs, les tests de terrain permettent souvent de tester plusieurs joueurs simultanément et présentent une validité écologique, une facilité de mise en œuvre plus importante et une reproductibilité acceptable.

Lorsqu'un test est standardisé avec des données représentatives correspondant à différents niveaux de pratique et différentes catégories d'âge aussi bien chez des joueuses que des joueurs, une approche statistique (régression multiple) prenant en considération le classement des joueurs testés comme critère externe peut être appliquée afin d'identifier le(les) indice(s) de l'aptitude physique le(les) plus sensible(s). A ce jour, des joueurs avec des profils très variés ont été évalués à partir de protocoles de tests très différents afin d'essayer d'identifier les principaux déterminants de la performance tennistique (classement) (Banzer et al. 2008; Brechbuhl et al. 2016; Girard et Millet, 2009). Au tennis, la complexité de la demande physique et énergétique implique qu'aucun consensus n'existe concernant le meilleur test à utiliser (*c-à-d.* le plus sensible aux variations attendues de potentiel athlétique) pour évaluer une qualité physique particulière. L'objectif de ce chapitre n'est pas de passer en revue toutes les procédures d'évaluation et de développement des qualités aérobies et anaérobies du joueur de tennis. L'objectif est plutôt, dans un premier temps, de présenter de manière critique les principaux tests physiques d'évaluation des qualités aérobies et anaérobies du joueur de tennis. Ensuite, plusieurs méthodes plus ou moins traditionnelles ou innovantes de développement des qualités énergétiques seront abordées.

### 1. Evaluation de l'aptitude aérobie

La  $VO_{2max}$  est définie comme « la quantité d' $O_2$  la plus élevée mesurée au niveau de la mer pouvant être consommée par un sujet par unité de temps au cours d'un effort musculaire ».

La consommation d' $O_2$  est décrite par l'équation de Fick:

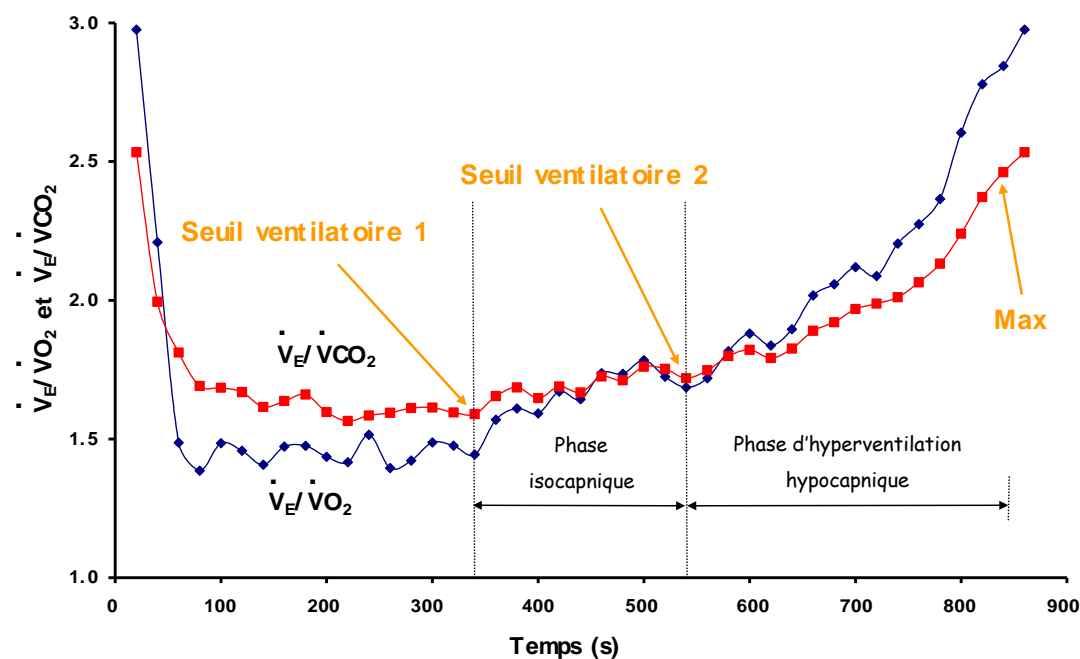
$$VO_2 = Qc \times [CaO_2 - CvO_2], \text{ autrement écrit } VO_2 = [FC \times VES] \times [\beta b \cdot (Pa - Pv)]$$

où  $Qc$  représente le débit cardiaque,  $CaO_2$  et  $CvO_2$  les contenus artériels et veineux en  $O_2$ ,  $FC$  la fréquence cardiaque,  $VES$  le volume d'éjection systolique,  $\beta b$  la pente de la courbe de dissociation de l' $O_2$  et  $Pa$ ,  $Pv$  les pressions partielles en  $O_2$  dans le sang artériel et veineux.

Dans l'ensemble, les joueurs de tennis possèdent une  $VO_2$  considérée comme modérée (tennis:  $\sim 55-60$   $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ ; Kovacs, 2007), similaire à celle des joueurs des sports collectifs (football) mais inférieure à celle des sportifs d'endurance. Au tennis, l'atteinte d'un niveau élevé de  $VO_{2max}$  ne constitue pas un critère discriminant de la performance contrairement à des activités continues de type cyclisme. Cependant, le joueur de tennis doté d'un niveau de  $VO_{2max}$  élevé supportera mieux la charge cardiovasculaire imposée lors des échanges (maintien des habiletés techniques) et améliorera sa récupération entre les points (recul de l'apparition de la fatigue). Cependant une amélioration de la  $VO_2$  trop marquée ( $> 55$  et  $65$   $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ , respectivement chez les joueuses et les joueurs de tennis, König et al. 2001), accompagnée d'une modification des fibres rapides en fibres lentes, ne semble pas souhaitable afin de ne pas nuire aux qualités de puissance et d'explosivité.

$VO_{2max}$  est calculée lors d'un test à charge croissante, en général sur un ergomètre le plus proche possible de l'activité sportive de l'athlète (*c-à-d.* ergocycle, tapis roulant, rameur) à partir des variables mesurées

suivantes (corrigées en fonction de la pression barométrique et de l'hygrométrie): ventilation et fractions inspirées et expirées en  $\text{VO}_2$  et  $\text{VCO}_2$ . La durée du test doit se situer entre 8 min (afin de respecter l'inertie du système aérobie) et 20 min (au-delà, risque de valeurs non maximales). La durée des paliers dépend du type d'analyse des seuils (*c-à-d.* 1 min pour les seuils ventilatoires;  $\geq 3$  min pour les seuils lactiques). Généralement, les protocoles avec des paliers plus courts induisent une puissance maximale aérobie plus élevée. Un test continu est recommandé dans les disciplines d'endurance. La situation est différente lorsqu'il s'agit d'évaluer des sujets de sports intermittents (sports collectifs, sports de raquette). Depuis une vingtaine d'années, l'apparition d'analyseurs portables des échanges gazeux (*p. ex.* Oxycon Mobile, Vmax, K4b2) permet la mesure de  $\text{VO}_{2\text{max}}$  et de la vitesse associée ( $v\text{VO}_{2\text{max}}$ ) lors de tests de terrain tels que le VAM-EVAL. La pertinence des mesures est fortement améliorée sans que leur validité ou reproductibilité soient trop altérées. Le critère principal d'atteinte de  $\text{VO}_{2\text{max}}$  n'a pas été modifié depuis 80 ans lorsque A. V. Hill a décrit un plateau de  $\text{VO}_2$  alors que l'intensité de l'exercice augmentait avant d'atteindre l'épuisement. Ce critère est maintenant extrêmement débattu et il a été montré que de nombreux athlètes ne présentent pas de plateau. D'autres critères sont utilisés en complément:  $[\text{La}] > 8 \text{ mmol.l}^{-1}$  durant les premières minutes de récupération; Quotient respiratoire  $> 1,10$ ; Atteinte de la  $\text{FC}_{\text{max}}$  théorique.



**Figure 1** – Détermination des seuils ventilatoires 1 et 2 lors du « Girard test » (Girard et al. 2006)

Les tests ont aussi pour objectif la détermination de seuils sous-maximaux qui permettront de définir des zones d'intensités distinctes (**Figure 1**):

- Le premier seuil ventilatoire (à l'origine, seuil anaérobie ou lactique) correspond à la première cassure du débit ventilatoire lors d'un test à charge croissante. Il se situe à 40-60% de  $\text{VO}_{2\text{max}}$ . Cette intensité est considérée comme la limite inférieure pour des adaptations notables de l'appareil cardio-respiratoire



chez le sportif entraîné. Ce seuil est considéré comme essentiel pour cibler les intensités strictement 'aérobie' chez les sportifs d'endurance (*c-à-d.* entraînement « polarisé »; Seiler, 2010)

- Le deuxième seuil ventilatoire (aussi appelé seuil de décompensation de l'acidose métabolique ou RCP en anglais) correspond à la deuxième cassure de ventilation accompagnée de la rupture de pente de l'équivalent respiratoire en CO<sub>2</sub>, expliqué principalement par l'augmentation des ions H<sup>+</sup>. Il se situe entre 60% (sédentaire) et 90% (sportif d'endurance entraîné) de VO<sub>2max</sub>. Ce seuil représente une deuxième intensité-clé pour l'entraînement des athlètes d'endurance.

Chez le joueur de tennis, on distingue les tests selon qu'ils sont effectués en laboratoire ou sur le court, selon qu'ils permettent de déterminer VO<sub>2max</sub> ou des seuils sous-maximaux; enfin selon qu'ils s'accompagnent d'une analyse technique/mécanique.

### **1.1. Tests en laboratoire**

Les tests incrémentaux en laboratoire sont classiquement utilisés pour évaluer l'aptitude aérobie d'un joueur à partir notamment de la mesure directe de la VO<sub>2max</sub>. La mesure des échanges gazeux en cycle-à-cycle est également utilisée pour identifier deux points de rupture caractéristiques correspondant au seuil ventilatoire et au point de compensation de l'acidose métabolique (Santos et Giannella-Neto, 2004). Ces points particuliers sont aussi considérés comme des marqueurs caractérisant les effets d'un programme d'entraînement donné afin de rendre compte du niveau de condition physique d'un joueur et d'identifier des plages d'intensité d'entraînement (Foster et Cotter, 2006). Si des protocoles de tests très variés (*c-à-d.* durée et intensité des paliers d'incrément) ont été proposés, l'objectif de ce chapitre n'est pas de tous les présenter (pour une revue, voir Bentley et al. 2007). Soulignons toutefois que si plusieurs ergomètres peuvent être utilisés, les joueurs de tennis devraient préférentiellement être testés sur tapis roulant en utilisant le même protocole de test afin d'offrir des comparaisons longitudinales objectives. Au tennis, l'activité ne persiste que lorsque la balle est en jeu. Le mode d'exercice pendant les tests de laboratoire (*c-à-d.* continu, course unidirectionnelle) ne reflète donc pas fidèlement la nature intermittente de l'activité au tennis. Outre la demande énergétique imposée aux joueurs pendant la compétition, la sollicitation des membres inférieurs lors des mouvements sur le court (*p. ex.* freinages, changements de direction et accélérations) et des membres supérieurs lors des frappes de balle ne peut pas être simulée lors d'un test classique en laboratoire. Elle doit donc être déterminée en temps réel sur le terrain.

### **1.2. Tests de terrain**

#### **1.2.1. Tests semi-spécifiques**

Plusieurs tests généraux progressifs de terrain ont été proposés au début des années 1980 (Brue, 1985; Léger-Boucher, 1980). Il s'agit d'épreuves collectives qui cherchent à déterminer la vitesse maximale aérobie, définie comme la vitesse théoriquement minimale sollicitant la VO<sub>2max</sub> (estimée indirectement selon des équations prenant en compte l'âge et le sexe des joueurs). Durant ces épreuves, qui utilisent

en fait le même type de protocole que certaines épreuves progressives d'évaluation directe de  $VO_{2max}$  en laboratoire, les joueurs courent à allure progressivement accélérée (émission de bips sonores), autour d'une piste de 200 ou 400 m le plus souvent. Cependant, il semblerait que le « *test navette* » d'évaluation de la vitesse maximale aérobie développé par Léger et Lambert (1982) soit celui qui est le plus utilisé aujourd'hui dans la majorité des structures de tennis (*p. ex.* écoles de tennis, ligues régionales, pôles France, centres nationaux d'entraînement et académies privées). Il s'agit pour les joueurs d'effectuer des courses navette entre deux plots espacés de 20 m, sous la forme d'allers - retours, et de suivre la vitesse indiquée par un coup de sifflet, une balise temporelle ou une bande sonore préenregistrée. A chaque signal sonore, le joueur doit se trouver au niveau de l'un des plots. La vitesse de course initiale est de  $8,5 \text{ km.h}^{-1}$  puis est progressivement incrémentée de  $0,5 \text{ km.h}^{-1}$  toutes les minutes. Chaque accélération correspond à une augmentation du coût énergétique de  $3,5 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ . De ce fait, chaque palier coïncide théoriquement à un coût énergétique donné. L'épreuve prend fin avec l'épuisement du joueur. La facilité de la mise en place du « *test navette* » (*c-à-d.* matériel restreint) et la possibilité de faire passer de nombreux individus lors d'une même session de test expliquent vraisemblablement sa popularité.

Cependant, en considérant le pattern d'activité intermittent au tennis, la pertinence de ces tests continus a été questionnée, conduisant au développement de procédures de tests comme les procédures « *Yo-Yo Intermittent Recovery* » (Bangsbo et al. 2008) et « *30-15 Intermittent Fitness Test* » (Buchheit, 2008) présentant un haut degré de validité et une excellente reproductibilité. Brièvement, les tests Yo-Yo consistent à répéter des courses navettes ( $2 \times 20 \text{ m}$ ) à une vitesse progressivement accélérée, alternés avec des périodes de récupération active ( $2 \times 5 \text{ m}$  jogging) de 10 s. Le niveau 1 démarre à une vitesse plus lente que le niveau 2 (vitesse initiale de 10 et  $13 \text{ km.h}^{-1}$ , respectivement) et l'incrément de charge est aussi plus modéré. Le test « *Yo-Yo-IR1* » évalue l'habilité à réitérer des efforts de façon intermittente avec une contribution aérobie plus marquée que le test « *Yo-Yo-IR2* » qui sollicite fortement aussi bien les systèmes aérobies et anaérobies de production d'énergie. Le « *30-15 Intermittent Fitness Test* » est constitué de périodes de course de 30 s, entrecoupées de périodes de récupération marchées de 15 s. Durant les périodes d'effort, il s'agit de courir en allers-retours, sur une distance de 40 m, à une vitesse progressivement incrémentée ( $0,5 \text{ km.h}^{-1}$ ) à chaque course par une bande sonore. Ces deux tests sont largement utilisés dans les activités intermittentes comme le tennis lorsqu'il s'agit de déterminer une vitesse de référence pour l'entraînement sur piste rendant compte des facteurs physiologiques mis en jeu; *c-à-d.* les capacités cardiorespiratoires, les qualités de récupération inter-efforts, les qualités neuromusculaires impliquées dans les changements de direction, (vitesse, force de freinage et explosivité) et la capacité anaérobie lactique. En revanche, ceux-ci demeurent trop peu spécifiques et ne respectent pas précisément les caractéristiques du jeu (*c-à-d.* distances de courses trop importantes, pas de prise d'information visuelle, changements de direction de type 'volte-face', course sans raquette). Aussi, des procédures de tests spécifiques au tennis ont été développées pour répondre à ces exigences.

### 1.2.2. Tests spécifiques

Évaluer les joueurs directement sur le terrain de tennis à partir de tests spécifiques répondant aux éventualités du jeu est pertinent. Depuis les travaux de Weber et Hollmann (1984), le développement de tests de terrain visant à déterminer le profil métabolique d'un joueur donné et/ou sa performance technique (*c-à-d.* précision/qualité de frappe) en situation de fatigue s'effectue dans des conditions standardisées (Davey et al. 2002; Smekal et al. 2000; Vergauwen et al. 1998). Deux aspects semblent donner plus de crédit aux tests spécifiques comparativement aux tests semi-spécifiques: (1) l'utilisation des dimensions du court de tennis et (2) la combinaison d'un jeu de jambes et de mouvements du haut du corps (*c-à-d.* mimer ou effectuer une frappe de balle) spécifiques. Alors que l'objectif poursuivi ici n'est pas de décrire l'ensemble des tests 'techniques' spécifiques au tennis, nous décrivons les principaux tests incrémentaux d'évaluation de l'aptitude aérobie dans des conditions proches du jeu (Baiget et al. 2014; Brechbuhl et al. 2016; Ferrauti et al. 2011; Girard et al. 2006; Smekal et al. 2000).

Le « **Field test** » (Smekal et al. 2000) est basé sur un test proposé initialement par Weber et Hollmann (1984) qui consistait en la réalisation de 12 frappes de balle de fond de court par minute, projetées par une machine lance-balle (standardisation de l'envoi des balles en terme de vitesse, effet, hauteur). L'incrémentaité était de + 2 balles.min<sup>-1</sup>. Des enregistrements de VO<sub>2</sub> obtenus lors d'un test en laboratoire étaient utilisés afin d'établir la charge initiale et l'incrémentaité (+ 2 balles.min<sup>-1</sup>) lors de ce test de terrain. Les principaux résultats de cette étude montrent des différences concernant les valeurs maximales des variables cardiorespiratoires (VO<sub>2</sub>, débit ventilatoire et [La] étaient inférieurs lors du test spécifique) suggérant une complémentarité des deux types de test. De plus, l'intensité du test de terrain (évaluée par le nombre de coups frappés par minute) était fortement corrélée ( $r = 0.94$ ) à l'ordre de classement des joueurs, suggérant que ce test est valide pour évaluer le niveau de performance. Toutefois, les principales limites de cette procédure sont (1) l'adoption d'un mode d'exercice continu; (2) l'alternance de coup droit et de revers uniquement (absence d'incertitude quant au coup à jouer), ce qui sollicite uniquement le style de jeu du défenseur de fond de court; (3) les obstacles liés à l'utilisation d'une machine lance balle (*c-à-d.* coût relativement élevé et la difficulté de transport) qui par ailleurs ne simule pas précisément la réalité du jeu. Ces inconvénients limitent l'usage de ce test par le plus grand nombre de joueurs.

Deux procédures de tests incrémentaux spécifiques (*c-à-d.* pattern d'activité discontinue et incluant des éléments du jeu), reproductibles et faciles d'utilisation ont été proposées par la suite; le « **Girard test** » (Girard et al. 2006) et le « **Hit & Turn tennis test** » (Ferrauti et al. 2011). Chacun de ces tests consiste à réaliser des déplacements types répétés reproduisant ceux observés au tennis, à vitesse croissante sur le court. Des frappes de balle sont simulées. La vitesse et la direction des mouvements sont dictées par des feedbacks visuels et auditifs. Globalement, la durée des paliers est de 20-45 s, entrecoupés de récupérations plus courtes (10-20 s) avec toutefois des différences entre ces deux protocoles de test.

Dans le « *Girard test* », chaque phase comprend sept courses allers-retours effectuées à partir d'une position centrale en direction d'une des six cibles situées sur le court, suivies d'une période de récupération active de 15 s (**Figure 2**). La durée du premier palier est fixée à 40,5 s puis le joueur dispose de 0,8 s de moins pour réaliser chaque nouveau palier. La mesure des gaz expirés chez des joueurs juniors montre que si l'apparition des seuils ventilatoires ne diffère pas entre ce test et un autre sur tapis roulant, en revanche, la  $VO_{2max}$  est plus élevée sur le test de terrain (63.8 vs. 58.9  $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ ) (Girard et al. 2006). La sous-estimation de la  $VO_{2max}$  indique que l'utilisation combinée de tests de laboratoire et de terrain serait une approche plus judicieuse pour évaluer le potentiel aérobie du joueur de tennis et fixer les intensités d'entraînement. Le « *Girard test* » présente l'avantage de pouvoir être associé au travail d'éléments techniques spécifiques au tennis (motivation accrue) et être facilement mis en place avec des joueurs de niveaux divers, puisqu'il est peu onéreux et ne nécessite que peu de matériel (*c-à-d.* 6 cônes, un mètre ruban et un ordinateur portable sur lequel est installé le logiciel conçu pour le test).

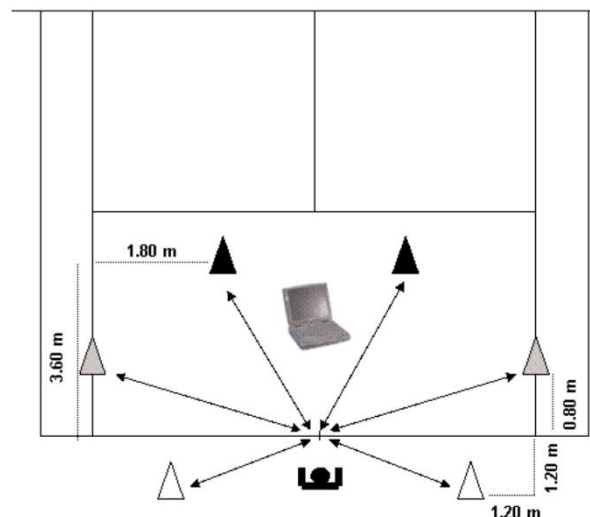
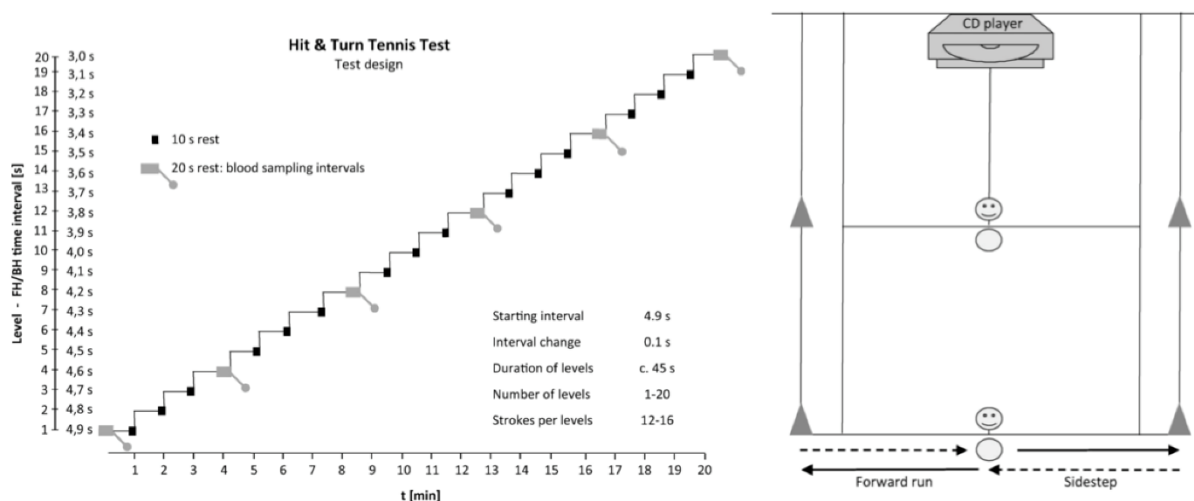


Figure 1. Configuration du court pour le test d'effort progressif conçu pour les joueurs de tennis. Indication de l'emplacement des cibles pour les déplacements vers l'avant (cônes noirs), les déplacements latéraux (cônes gris) et les déplacements vers l'arrière (cônes blancs).

**Figure 2** - Configuration du court pour le « *Girard test* » (Girard et al. 2006). Indication de l'emplacement des cibles pour les déplacements vers l'avant (cônes noirs), les déplacements latéraux (cônes gris) et les déplacements vers l'arrière (cônes blancs).

*Chaque série de sept courses incluait deux courses vers l'avant (offensives), trois courses latérales (neutres) et deux courses vers l'arrière (défensives) réalisées de manière aléatoire. Une fois arrivé à l'endroit de la cible, le sujet devait mimer une frappe puissante comme s'il était en match, puis reculer vers la ligne de fond après chaque coup. Les vitesses et directions des déplacements étaient contrôlées par des retours visuels et sonores à partir d'un ordinateur. Brièvement, un logiciel spécifique était utilisé afin d'émettre un son (bip) et de projeter simultanément une image d'un joueur se déplaçant autour de la cible à atteindre.*

Le « **Hit & Turn tennis test** » propose de réaliser des paliers incluant 12 à 16 coups droits et revers alternativement (déplacement parallèle à la ligne de fond de court) (Ferrauti et al. 2011) (**Figure 3**). Il est constitué de 20 niveaux avec une diminution du temps (0,1 s) lors de chaque nouveau palier de sorte que la durée du palier 1 et 20 sont respectivement de 4,9 et 3,0 s. La durée de récupération est de 10 s sauf entre les paliers 4, 8, 12 et 16 où la durée de 20 s permet éventuellement d'évaluer la [La]. Un avantage du « **Hit & Turn tennis test** » est qu'il permet d'estimer la  $VO_{2max}$  [catégorie moins de 14 ans et garçons :  $f(x) = 1.68x + 31.0$  ; avec x le nombre de paliers atteints]. Par ailleurs, des tableaux normatifs du nombre de paliers à atteindre en fonction du genre et de l'âge des joueurs testés ont été produits (Ulbricht et al. 2015). Alors que ces deux tests incluent des frappes de balle simulées, soulignons que cela ne reflète pas fidèlement la réalité d'une frappe de balle car il a notamment été montré que le travail des membres supérieurs contribue considérablement à la dépense énergétique globale (*c-à-d.* augmentation de la  $VO_2$  avec la vitesse des frappes de balle; Fernandez Fernandez et al. 2010).

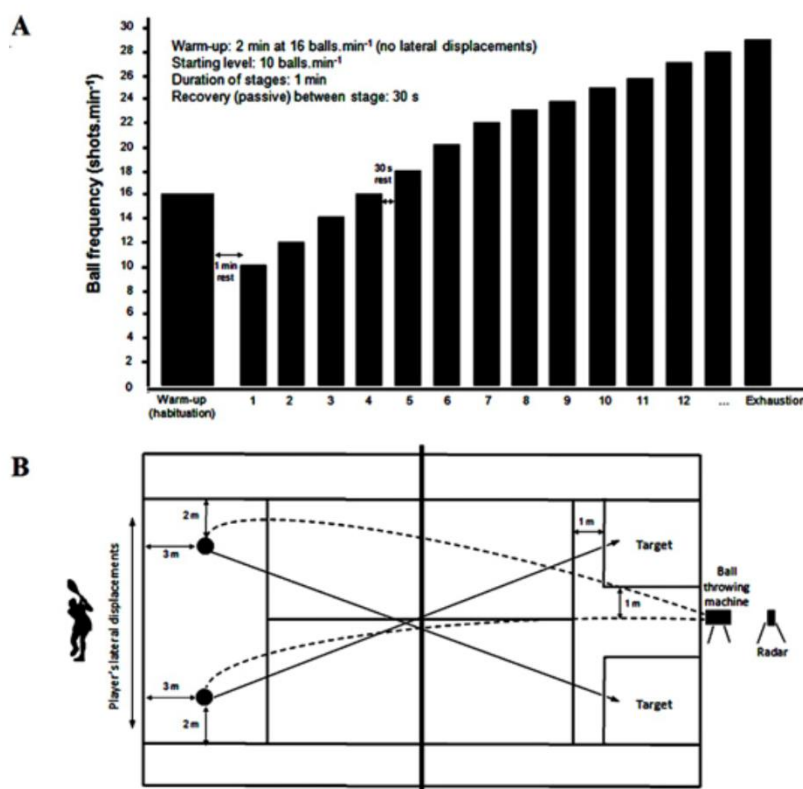


**Figure 3** - Protocol du « **Hit & Turn tennis test** » avec paliers d'incrément (Ferrauti et al. 2011).

Plus récemment, le « **Baiget test** » (Baiget et al. 2014) a été proposé sur la base du « **Field test** » (Smekal et al. 2000) mais avec des paliers plus courts (2 vs. 3 min) et une fréquence de frappe de balle lors du palier initial plus faible (9 vs. 12 balles.min<sup>-1</sup>). Chez 38 joueurs de bon niveau, l'efficacité technique (% frappes réussies) moyenne était de 63% et conduisait à identifier des phases distinctes (adaptation, efficacité technique maximale, diminution constante) lors de la réalisation du test. Ce test autorise notamment de discriminer les joueurs de niveau international vs. national; en effet, avec une aptitude aérobie davantage développée les joueurs internationaux maintiennent une meilleure efficacité technique aux intensités élevées (Baiget et al. 2016). Un autre avantage du « **Baiget test** » est qu'il permet, à partir de l'évaluation combinée du point de compensation métabolique et de l'indice d'efficacité technique de prédire le niveau de performance en compétition (classement) des joueurs testés (Baiget et al. 2014). Enfin, l'aptitude aérobie évaluée à partir de cette procédure est un bon prédicteur de l'intensité cardio-métabolique soutenue lors d'un match; *c-à-d.* les joueurs avec une

aptitude aérobie plus développée sont aussi ceux qui jouent à des intensités relatives plus faibles en match (Baiget et al. 2015).

En 2016, la procédure « *TEST ou Test to Exhaustion Specific to Tennis* » a été développée comme test fédéral de référence pour évaluer l'aptitude aérobie auprès des meilleurs joueurs français appartenant aux groupes d'entraînement élités de la Fédération Française de Tennis (Brechbuhl et al. 2016). La procédure « *TEST* » consiste à frapper des balles alternativement en coup droit et revers croisés qui sont lancées à une vitesse moyenne de 86 km.h<sup>-1</sup> par une machine 'Hightof' (**Figure 4**). Après une phase d'habituatation de 2 min (16 frappes.min<sup>-1</sup>), le palier initial est de 10 frappes.min<sup>-1</sup> et l'incrément est de +2 frappes.min<sup>-1</sup> chaque minute jusqu'à 22 frappes.min<sup>-1</sup>, puis de +1 frappe.min<sup>-1</sup> jusqu'à l'épuisement. Une récupération (passive) de 30 s est observée entre chaque palier. Ce test permet une évaluation simultanée des composantes énergétiques et techniques. Comparativement au « *test navette* » de Léger et Lambert (1982), au point de compensation de l'acidose métabolique, les valeurs de VO<sub>2</sub> (mais pas celles de FC) sont majorées alors qu'aucune différence physiologique n'est observée à la charge maximale. Par ailleurs, la VO<sub>2</sub> comme mesurée à intensité sous-maximale et maximale aussi bien lors de « *TEST* » que du « *test navette* » est un prédicteur 'modéré' (-0.38 < coefficients de corrélations < -0.55) du classement des joueurs.



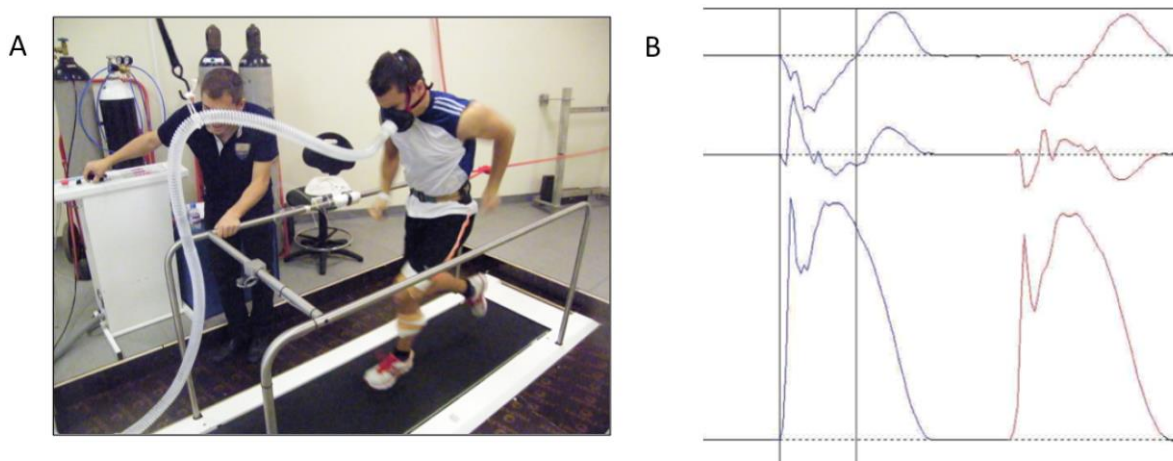
**Figure 4** - Protocol (A) et représentation schématique (B) de la procédure « *TEST* » (Brechbuhl et al. 2016)

## 2. Evaluation de l'aptitude anaérobie

L'évaluation directe de la production d'ATP par la voie anaérobie est délicate de sorte que des méthodes d'évaluation indirecte ont été développées. Celles-ci incluent la mesure (1) des métabolites musculaires à partir de biopsies, (2) la [La] lors d'exercices supra-maximaux, (3) le déficit maximal accumulé en O<sub>2</sub>, (4) le travail fourni ou la puissance produite lors d'exercices maximaux de courte durée (sprint de type Wingate, sauts). L'évaluation du métabolisme anaérobie s'effectue en déterminant la capacité anaérobie et la puissance anaérobie. Les tests du métabolisme anaérobie explorent les efforts explosifs ou alactiques (moins de 15 s) et les efforts dits de résistance ou lactiques (de 15 s à 2 min environ).

### 2.1. Tests en laboratoire

Du fait de son aspect pratique, dans la majorité des sports, l'évaluation du pic de puissance pouvant être produite est souvent obtenue lors de la réalisation du test de Wingate de 30 s. Ceci malgré le fait que les exercices de durée inférieure à 60 s ne permettent pas d'épuiser complètement les systèmes anaérobies de production d'énergie. Plus spécifiquement, l'utilisation de ce test réalisé sur cyclo-ergomètre au tennis pourrait être questionnée, notamment en considérant l'absence de corrélation significative entre le classement de joueuses élites et la puissance maximale attendue lors d'un test Wingate (Ziemann et al. 2011). L'appréciation de la puissance produite sur tapis roulant non-motorisé (en particulier la puissance propulsive dans la direction horizontale) semble plus appropriée dans les activités intermittentes comme le tennis (**Figure 5**). Jusqu'alors, l'exploration des productions de force, vitesse et puissance mécanique n'était possible que sur des tapis roulant non-motorisés sur lesquels les individus accélèrent la bande du tapis, tout en étant retenus par l'arrière via une longe incluant un capteur de force (Chelly et Denis 2001). Une limitation avec ces systèmes est que la puissance de propulsion produite dans la direction horizontale n'est pas précisément évaluée car la force de traction est mesurée entre le sujet et la structure d'ancrage de la longe qui le retient. La validation récente d'un tapis roulant instrumenté permettant la mesure des forces de réaction au sol (et donc la puissance propulsive dans la direction horizontale) lors du sprint a permis de contourner ces limitations. Equipés de capteurs piézoélectriques l'avantage de réaliser des sprints sur le tapis roulant ADAL (accélération/décélération de la bande du tapis par les seules forces appliquées au sol par le coureur) est de pouvoir mesurer les forces de réactions au sol lors de chaque pas et de dériver des informations sur la qualité de la foulée et la technique d'application de la force produite comme facteur de la performance (Morin et al. 2010), même si seuls des déplacements unidirectionnels (vers l'avant) sont possibles. Cet outil, en revanche, reste difficile d'accès car seulement deux modèles existent dans le monde. Des procédures de terrain sont donc nécessaires pour une utilisation par le plus grand nombre.



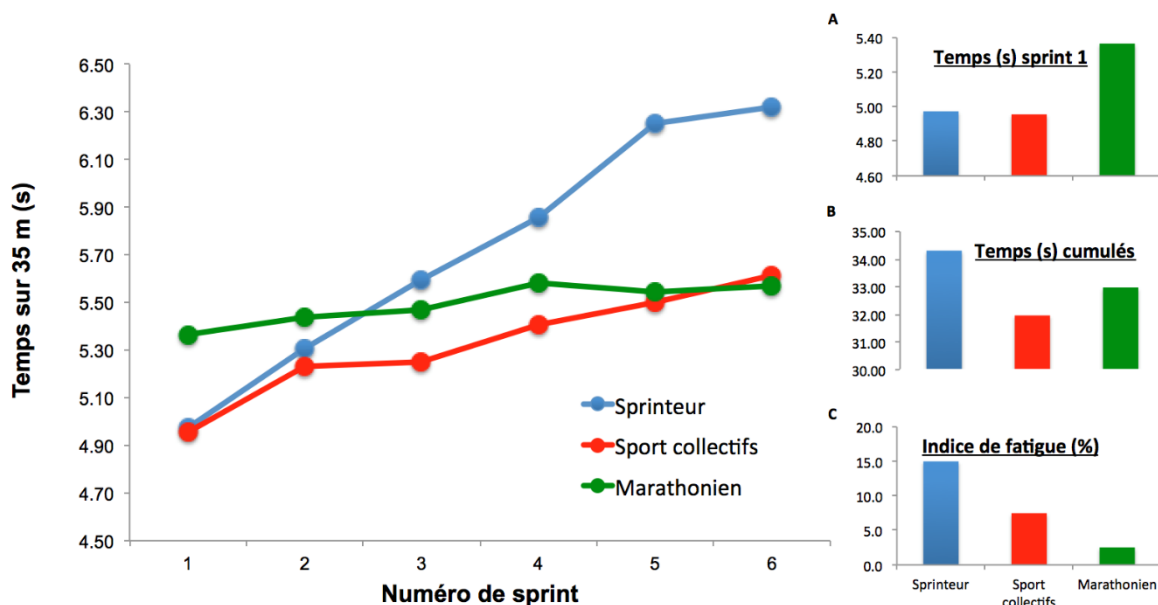
**Figure 5** - Tapis roulant instrumenté de type ‘sprint’ avec mesure des gaz expirés (A) et mesures en continu (pas à pas) des forces de réaction au sol (B) (Morin et al. 2010).

## 2.2. Tests de terrain

Des tests de terrain ‘anaérobies’ consistent notamment à mesurer  $[La]$  en réponse à des sprints maximaux sur des distances de course données (*c-à-d.* 60 - 200 m). Toutefois, l’évaluation de la capacité à répéter des sprints (CRS ou « Repeated-Sprint Ability » dans la littérature anglo-saxonne). est certainement une approche plus spécifique. La CRS correspond à l’exécution répétée d’efforts (p. ex. sprints, sauts, poussées) de courte durée ( $< 10$  s) et d’intensité maximale ou presque, entrecoupés de brèves ( $< 30$  s) périodes de récupération souvent incomplètes (Girard et al. 2011). Sur le terrain la CRS est généralement déterminée à partir de la répétitions de sprints de courte durée (4-10 s) ou sur des distances entre 15 et 40 m avec des périodes de récupération incomplètes (10-30 s). Dans la mesure où la CRS dépend à la fois de système de fourniture d’énergie aérobie et anaérobie dont la contribution respective dépend par ailleurs du ratio exercice : récupération et le nombre de répétitions la CRS ne peut pas être classifiée comme un test purement anaérobie.

L’évaluation de la CRS consiste à mesurer conjointement trois paramètres (a) le pic de vitesse ou le temps pour couvrir une distance donnée sur un sprint isolé, (b) la vitesse moyenne ou le temps cumulé sur l’ensemble des répétitions et (c) l’aptitude à maintenir une performance élevée au cours du test (indice de fatigue) comme décrit par ailleurs (**Figure 6**) (Girard et al. 2011). Si la mesure de la performance lors d’une série de sprints répétés (temps cumulés ou moyens) pourrait davantage refléter la puissance anaérobie, la capacité à résister à la fatigue (indice de fatigue) serait davantage reliée à l’aptitude aérobie (Dawson, 2012).





**Figure 6** - Trois critères pour refléter la capacité à répéter des sprints en course à pied. Ici un marathonien, un sprinteur et un joueur de sports collectifs ont réalisé 6 x 35 m avec 10 s de récupération. Cet exemple illustre qu'un marathonien (faible indice de fatigue mais performance médiocre sur sprint isolé et temps cumulés lents) n'a pas nécessairement une meilleure CRS qu'un sprinteur (large indice de fatigue mais bonne performance sur sprint isolé et temps cumulés moyens) alors que la CRS du joueur de sports collectifs ou de raquette est bien meilleure (bonne performance sur sprint isolé, excellent temps cumulés et indice de fatigue modéré).

L'évaluation de la CRS n'est pas encore systématique dans les batteries de tests de l'ensemble des fédérations nationales et il n'existe pas de test de référence avec des données normatives. Par exemple, la fédération Australienne de tennis recommande de réaliser 10 x 20 m avec 20 s de repos. Enfin, une série de sprints répétés (3 x 15 m, 15 s de repos) réalisés avant, pendant et directement à l'issue de match de tennis d'~2h souligne une détérioration de la CRS à la moitié du match et peu de changements par la suite (Girard et al. 2014). Une diminution du meilleur sprint (-12%), du temps total (-10%), et de l'indice de fatigue (-14%) ont également été rapportés lors d'un test de sprints répétés (6 x 30 m, 30 s de récupération active) avant vs. après un match en trois sets (Piovannini, 2015).

### 3. Méthodes de développement des qualités aérobie et anaérobie

#### 3.1. Généralités

L'entraînement aérobie s'appuie sur une méthodologie scientifique. On distingue les formes 'continues' et les formes 'intermittentes' qui seront privilégiées chez le joueur de tennis. Les formes de travail continu se font essentiellement aux intensités inférieures à SV1. Le contrôle des allures se fera principalement par la FC. L'utilisation de la FC nécessite de connaître les facteurs d'influence (*c-à-d.* hygrométrie, déplétion glycogénique, altitude, température, réduction du volume plasmatique) pour ne pas induire des intensités erronées. L'entraînement sous la forme d'« exercices intermittents à haute intensité » (high-intensity interval training ou HIIT) consiste en un type d'entraînement où sont alternées

pendant une ou plusieurs séries des fractions d'effort et des fractions de récupération. Pour apprécier la charge de travail d'une séance HIIT et les adaptations physiologiques induites il faut définir précisément les paramètres qui la composent: intensité et durée des fractions d'effort; intensité, type et durée de fractions de récupération; ratio; amplitude; nombre total de répétitions et de séries (Buchheit et al. 2013a).

Parmi les formes spécifiques, le joueur de tennis utilisera des formes intermittentes plus intenses. Pour ce type de séances intermittentes aux intensités légèrement supra-maximales, il semble que la plage des intensités les plus « efficaces » pour ce type de travail se situe généralement entre 110 et 120%  $vVO_{2max}$ . Cependant, le pourcentage optimal de  $vVO_{2max}$  dépend de la vitesse maximale absolue (vitesse de sprint) de l'athlète et l'intensité peut aussi être exprimée en pourcentage de la « réserve de vitesse anaérobie » (*c-à-d.* différence entre vitesse de sprint et  $vVO_{2max}$ ) (Blondel et al. 2001).

On sait également que l'efficacité des séances intermittentes est dépendante de la cinétique de  $VO_2$  d'un joueur. Si la cinétique (vitesse du déplacement de l' $O_2$  dans notre organisme) du joueur est lente, il tirera un bénéfice à utiliser soit des fractions d'exercice plus longues, soit à augmenter légèrement l'intensité (Millet et al. 2003a; Millet et al. 2003b). Comme l'intermittent supra-maximal par définition est effectué à des vitesses supérieures à  $vVO_{2max}$ , il permettra d'atteindre des valeurs proches de  $VO_{2max}$  plus rapidement que les cinq ou six répétitions nécessaires dans le meilleur des cas sur une séance de 30 s / 30 s à 100%  $vVO_{2max}$ . Là aussi, l'augmentation de l'intensité profitera d'abord aux joueurs ayant une cinétique lente. Enfin, l'exercice intermittent aérobie supra-maximal pourrait induire des adaptations musculaires plus importantes (*c-à-d.* gain de force spécifique, rendement du cycle-étirement-raccourcissement). La littérature scientifique témoigne de l'efficacité de ce type d'entraînement puisque sont rapportées des adaptations centrales (*c-à-d.* amélioration de la puissance maximale aérobie et de la capacité anaérobie) et périphériques (*c-à-d.* augmentation de l'activité enzymatique oxydative et glycolytique).

Par ailleurs, l'amélioration des qualités de course et d'explosivité étant peu marquée suite à un programme d'entraînement fondé uniquement sur la pratique du tennis, la mise en place de séances complémentaires spécifiques de vitesse, d'endurance et d'explosivité apparaît comme un complément indispensable (Girard et al. 2005). De manière relativement surprenante, le nombre d'études décrivant les méthodes les plus efficaces conduisant à une amélioration de l'aptitude aérobie et/ou de la CRS du joueur de tennis est plutôt restreint. En l'absence d'évidence scientifique forte, deux stratégies d'entraînement principales ont émergé (Bishop et al. 2011). La première repose sur le principe de spécificité de l'entraînement et indique que la meilleure manière d'améliorer ces aptitudes physiques consiste à utiliser des routines d'exercice directement sur le terrain (Murphy et al. 2016). La seconde

propose que des routines d'entraînement plus génériques (certaines sont décrites plus bas), visant à améliorer les principaux facteurs limitant, seraient plus efficaces.

### 3.2. Exercices intermittents à haute intensité

L'entraînement sous la forme d'« exercices intermittents à haute intensité » (high-intensity interval training ou HIIT) est une modalité reconnue pour améliorer efficacement et harmonieusement les fonctions cardiorespiratoires, métaboliques et neuromusculaires (Buchheit et Laursen, 2013a; Buchheit et Laursen, 2013b), et le niveau de performance physique avec des gains souvent supérieurs comparativement aux modalités en continu et d'intensité moindre (Gibala et McGee, 2008). HIIT consiste à répéter des séries d'efforts de durée moyenne (2-4 min), d'intensité élevée (80-100%  $VO_{2max}$ ) et entrecoupées de récupération plus courtes (1-3 min). Afin de prescrire une séance HIIT il est possible de manipuler plusieurs variables qui vont influencer la sévérité des réponses physiologiques (et donc les gains attendus): durée et intensité des périodes d'exercice et de récupération, modalité d'exercice, nombre de répétitions et de séries ainsi que la durée et l'intensité des récupérations entre les séries.

Il a été suggéré qu'il est nécessaire de stimuler fortement et sur des durées suffisamment longues (plusieurs minutes  $> 90\% VO_{2max}$  au sein de la séance) les systèmes de transport et d'utilisation de l' $O_2$  afin de créer un stimulus efficace (large recrutement de fibres rapides et atteinte de débits cardiaques élevés) pour améliorer la  $VO_{2max}$  (Billat, 2001). Ainsi, plusieurs études dérivées des sports collectifs (football) soulignent que HIIT (périodes d'exercice et de récupération entre 15 s et 4 min; 90-100%  $VO_{2max}$  ou  $> 90\% FC_{max}$ ; ratios exercice : récupération 1:1 - 4:1) (Buchheit et al. 2013a) est efficace pour améliorer la capacité aérobie sans effets négatifs sur les qualités de force, vitesse ou puissance (Impellizzeri et al. 2006). De part une augmentation de la taille du myocarde, du flux sanguin et des possibilités de dilatation des artères (Rakobowchuk et al. 2008), cette forme d'entraînement semble particulièrement efficace pour accélérer les cinétiques de  $VO_2$  et donc majorer la  $VO_{2max}$  (Krustrup et al. 2004). La capacité à soutenir un exercice intense pendant une durée plus longue et de mieux récupérer entre les efforts sont les effets recherchés associés à HIIT. A noter que la rapidité de la cinétique de  $VO_2$  lors d'une transition repos-exercice conditionne la durée passée proche de  $VO_{2max}$  et donc l'amplitude des adaptations et permet de mieux ajuster les paramètres de HIIT, en particulier la durée et l'intensité de l'intervalle de travail, en fonction des caractéristiques individuelles des joueurs. Ainsi les athlètes avec une cinétique plus lente ont fortement intérêt à utiliser des fractions d'efforts plus longues ou des intensités supra-maximales (*p. ex.* 1 min à 100 %VMA ou 30 s à 105% VMA) alors que des joueurs avec des cinétiques plus rapides peuvent utiliser avec succès des séances d'intermittent court-court (*p. ex.* 30 s à 100%VMA) (Millet et al. 2003a; Millet et al. 2003b). Par ailleurs, la cinétique de  $VO_2$  influence les réponses lors de répétitions de sprint: les athlètes avec une cinétique rapide sont capables de mieux stabiliser leur vitesse lors de séance de CRS (Dupont et al. 2005).

Un avantage de HIIT est de pouvoir développer de manière concomitante d'autres facteurs tels que le taux de resynthèse de la phosphocréatine (Bishop et al. 2008) et la capacité tampon du muscle (Edge et al. 2006). Les athlètes possédant une aptitude aérobie mieux développée ( $VO_{2max}$  et/ou seuil lactique élevés) devraient être capables de resynthétiser la phosphocréatine plus rapidement entre les efforts maximaux. En effet, il est ici intéressant de noter que HIIT (6-12 × [2 min à 100%  $VO_{2max}$ ; 1 min de repos]) améliore le taux de resynthèse de la phosphocréatine pendant les 60 premières secondes après un exercice à haute intensité (Bishop et al. 2008). Pour augmenter la  $VO_{2max}$  des joueurs de tennis collectifs, il est préférable d'utiliser un HIIT (80-90%  $VO_{2max}$ ) avec des périodes de repos (1 min) qui sont plus courtes que les périodes de travail (2 min). Afin de moduler la composante physiologique et ([La]) neuromusculaire et donc obtenir des adaptations spécifiques pour chaque joueur, il est aussi possible de réaliser des courses avec changements de direction ou des sauts pendant les périodes de récupération, de s'entraîner sur différents types de surfaces ou en faisant varier la pente (Buchheit et al. (2013b). En comparant différents angles lors d'efforts avec changements de direction avec des courses en ligne droite, par exemple, Buchheit et al. (2012) ont souligné que la performance et les réponses physiologiques / perceptuelles étaient étroitement dépendantes de l'angle (améliorées pour 135°, altérées pour 45°).

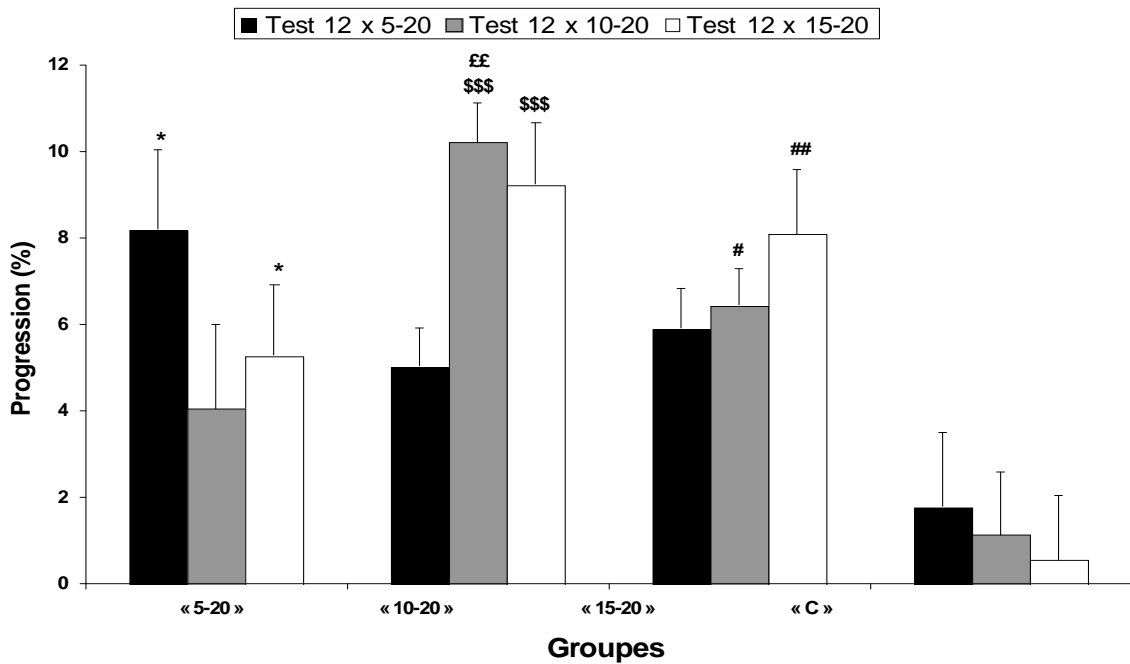
Un travail de comparaison des effets d'un entraînement de six semaines de type HIIT (3 × [3 × 90 s], 90-95%  $FC_{max}$ ) et un autre à base de sprints répétés (3 × [10 × 22 m], 20 s de récupération passive) a été effectué par Fernandez-Fernandez et al. (2012). Les résultats montrent que les deux méthodes augmentent la performance générale (*p. ex.* capacité aérobie, vitesse de sprint et hauteur de saut) et la CRS (10 sprints navette de 22 m, 15 s de repos). Malgré tout, les progressions obtenues ne sont pas identiques: l'entraînement HIIT augmente davantage le score sur le « *Hit & Turn tennis test* » alors que l'entraînement de sprints répétés en ligne droite augmente davantage (+3.8%) la CRS. Plus récemment, ces mêmes auteurs ont comparé les effets de l'entraînement (8 semaines) à partir d'exercices réalisés sur le terrain (mouvements rapides combinés avec des frappes de balles) combiné ou non avec des séances HIIT (90-95% de la VMA déterminée avec le « *30-15 Intermittent Fitness Test* ») sur la performance physique des joueurs d'une quinzaine d'années (Fernandez-Fernandez et al. 2016). Des gains deux ( $VO_{2max}$  : +2.4% *vs.* +4.2%) à trois fois (VMA lors du « *30-15 Intermittent Fitness Test* » : +6.3% *vs.* +2.2%) supérieurs résultaient du régime combinant les deux formes d'entraînement. La combinaison de plusieurs types d'entraînement serait d'autant plus bénéfique afin d'atteindre une augmentation globale des qualités physiques d'un joueur.

### 3.3. Sprints répétés

L'entraînement à base de sprints répétés est une méthode d'entraînement largement répandue dans les sports de raquette comme le tennis afin d'améliorer la CRS, mais pas uniquement. Une récente méta-

analyse a souligné que l'entraînement à base de sprints répétés est efficace pour améliorer simultanément plusieurs aspects essentiels (force, vitesse, endurance) de la performance physique (Taylor et al. 2015). Notamment, des effets « bénéfiques faibles », « modérés » et « larges » ont été rapportés concernant les gains pour des sprints de 10 m (1.99 vs. 1.94 s; -0.04 [ $\pm 0.02$ ]; n = 8 études), 20 m (3.25 vs. 3.10 s; -0.07 [ $\pm 0.08$ ]; n = 4 études) et 30 m (5.30 vs. 4.99 s; -0.30 [ $\pm 0.41$ ]; n = 2 études). De la même manière, l'entraînement basé sur la répétition de sprints induit une augmentation « modérée » de la performance intermittente de haute intensité en course à pied (1532 vs. 1816 m; 309 [ $\pm 248$ ]; n = 3 études). Soulignons toutefois les différences méthodologiques (*c-à-d.* distance de sprints allant de 5 à 80 m; fréquence de l'entraînement entre 1 et 6 séances par semaine; ratio exercice : récupération variant entre 1:2 et 1:10) considérables entre les protocoles d'entraînement des études incluses dans cette méta-analyse.

Spécifiquement au tennis, un entraînement conduit sur 8 semaines à base de sprints répétés (3-4  $\times$  [5-6  $\times$  15-20 m], 25 s de repos), combinés avec de la force explosive (3-4  $\times$  [4-6 exercices  $\times$  12-15 répétitions], 3 min de récupération passive) améliore la performance chronométrique lors d'un sprint de 10 mètres, la détente verticale lors d'un contre-mouvement jump, mais aussi le meilleur temps et la moyenne lors de sprints répétés (6  $\times$  [2  $\times$  15m], 20 s de repos) (Fernandez-Fernandez et al. 2015). Par ailleurs, un entraînement de 5 semaines en sprints répétés (3-4  $\times$  [4-6  $\times$  10-20 m]) avec changements de direction augmente davantage la performance physique et notamment la CRS (6  $\times$  20 m, 15 s de repos) de jeunes joueurs qu'un entraînement de sprints répétés en ligne droite (Girard et Durussel, 2015). Enfin, la comparaison des effets d'un entraînement (4  $\times$  [6  $\times$  10-s d'exercice intense, 10 s de repos]) de 8 semaines réalisé sur le court (exercices avec raquette) ou sur tapis roulant montre des gains de  $VO_{2max}$  (6-10%) comparables mais une résistance à la fatigue (« *Loughborough Intermittent Tennis Test* ») accrue uniquement avec la première modalité (Srihirun et al. 2014). Ces études soulignent la spécificité des effets de l'entraînement.



**Figure 7** - Progression (%) concernant la performance chronométrique moyenne lors des tests « 12 x 5-20 », « 12 x 10-20 » et « 12 x 15-20 » pour les groupes s'entraînant en intermittent court (« 5-20 »,  $n = 6$ ), moyen (« 10-20 »,  $n = 6$ ), et long (« 15-20 »,  $n = 6$ ) et le groupe contrôle (« C »,  $n = 6$ ) (Girard et al. 2009).

\*  $p < 0,05$ , pour différence significative entre les groupes « 5-20 » et « C »

\$\$\$  $p < 0,001$ , pour différence significative entre les groupes « 10-20 » et « C »

#  $p < 0,05$ ; ##  $p < 0,01$ , pour différence significative entre les groupes « 15-20 » et « C »

££  $p < 0,01$ , pour différence significative entre les groupes « 5-20 » et « 10-20 »

Trois modalités d'entraînement spécifiques au tennis (sur le court avec des déplacements spécifiques) ont été comparées, afin d'observer les effets de différents ratios exercice : récupération sur la CRS (**Figure 7**) (Girard et al. 2009). Toutes les modalités (5-20, 10-20 et 15-20) ont été mises en place afin de se rapprocher au maximum des déplacements spécifiques du tennis. La durée des exercices différait (5-10-20 s) alors que la récupération était identique (20 s) pour les 3 groupes. Les joueurs recrutés se sont entraînés deux fois par semaine durant six semaines selon l'une de ces modalités et ont été testés sur chaque type de déplacement. Tous les groupes ont augmenté leur performance chronométrique moyenne de manière significative entre les pré et post-tests alors que le groupe contrôle ne modifiait pas sa performance. Cela confirme qu'un entraînement intermittent intégré à l'entraînement classique est bénéfique sur les performances physiques spécifiques du joueur de tennis. Cependant, le fait que chaque groupe a davantage progressé sur la durée d'effort sur laquelle il s'est entraîné illustre parfaitement le principe de spécificité de l'entraînement.

### 3.4. L'entraînement en altitude comme approche innovante

L'entraînement en altitude a longtemps été utilisé les sportifs d'endurance afin d'améliorer leur capacité de transport de l'O<sub>2</sub> à partir de l'application des méthodes « vivre en altitude et s'entraîner en altitude » et plus récemment « vivre en altitude et s'entraîner au niveau de la mer ». Les joueurs viennent faire des séjours en stations de sport d'hiver avec entraînement dans la vallée (Crans Montana en Suisse) ou des

stages dans des hôtels disposant de chambres hypoxiques (Prémanon, France; Doha, Qatar). Ces méthodes sont un compromis judicieux en période de préparation foncière puisqu'elles permettent un bon développement des qualités aérobies *via* une augmentation notable (3-4%) de masse en hémoglobine sur une période courte d'une quinzaine de jours (Brocherie et al. 2015) tout en permettant de garder de l'explosivité en s'entraînant en plaine. Une récente méta-analyse indique que la masse en hémoglobine augmente de ~1% pour 100 h d'exposition en altitude, quel que soit le type d'exposition [« *vivre en altitude et s'entraîner en altitude* » (>2100 m) ou « *vivre en altitude et s'entraîner au niveau de la mer* » (~3000 m)] (Gore et al. 2013). Ces méthodes ne sont pas sans générer de frais (voyage, hébergement), et surtout sans modifier les habitudes d'entraînement et doivent donc être bien planifiées pour une meilleure efficacité.

Plus récemment, les méthodes « *vivre au niveau de la mer et s'entraîner en altitude* » se sont développées, vraisemblablement pour améliorer la résistance à la fatigue dans les périodes intenses ou à la fin d'un match (McLean et al. 2014). Celles-ci présentent notamment les avantages de coûts et déplacements limités pour les joueurs qui peuvent conserver leur mode de vie habituel. Alors que l'amélioration du potentiel de production d'énergie glycolytique et de la capacité aérobie pourrait représenter une caractéristique importante de « *l'entraînement intermittent en hypoxie* », les études scientifiques ne présentent souvent pas d'effet supplémentaire de l'exposition hypoxique par rapport au même entraînement conduit au niveau de la mer (Faiss et al. 2013). Comparativement aux athlètes qui se sont entraînés en plaine, par exemple, des joueurs de sports collectifs ont vu leur  $VO_{2max}$  et leur puissance produite lors d'un test de Wingate améliorée (6-8%) de manière comparable après 12 séances (10 × 1-min à 80% puissance maximale, 2 min de repos) en altitude (2750 m) en quatre semaines (Morton et Cable, 2005). L'intensité diminuée du stimulus d'entraînement en raison de l'hypoxie reste une limitation inhérente à « *l'entraînement intermittent en hypoxie* » (McLean et al. 2014).

Une solution consiste à s'assurer de solliciter de façon maximale l'organisme avec des intervalles très courts (*p. ex.* où il s'agit « de tout donner »). L'entraînement de sprints répétés ayant fait ses preuves (voir plus haut), l'ajout d'un stress hypoxique pourrait conduire à des adaptations musculaires plus larges se traduisant par une amélioration de la glycolyse anaérobie et une meilleure efficacité musculaire, en particulier au niveau des fibres rapides (Faiss et al. 2013). Voilà qui nous amène à considérer l'entraînement de type « répétition de sprints en hypoxie » (RSH) qui consiste à effectuer un entraînement en hypoxie sous la forme d'efforts maximaux de courte durée ( $\leq 30$  s) entrecoupés de phases de récupération incomplète. Même si aucune étude n'a à ce jour testé l'efficacité de cette méthode chez des joueurs de tennis, observons que chez de jeunes footballeurs de bon niveau, un entraînement RSH sous forme de navettes aller-retour (distances de course < 5 m) dans une chambre hypoxique a également induit une meilleure résistance à la fatigue lors de sprints répétés comparativement au même entraînement en plaine (Gatterer et al. 2014). Une méta-analyse récente réunissant les 9 études publiées

à ce jour montrent que RSH représente assurément un modèle d'entraînement prometteur (Brocherie et al. 2016). Comparativement au même entraînement réalisé proche du niveau de la mer, cette analyse souligne des gains supérieurs post-RSH concernant les niveaux de puissances moyennes et pics produits lors d'une série de sprints répétés, quoique ses mécanismes d'actions sous-jacents demeurent peu étudiés pour l'heure. Des études RSH sont en cours dans la nouvelle salle hypoxique au sein du nouveau Centre National d'Entraînement de la FFT (**Figure 8**). D'autres méthodes telles que « *la restriction du flux sanguin* » (occlusion vasculaire favorisant les gains de masse musculaire/force) ou le « *pré-conditionnement hypoxique* » (alternance de périodes d'ischémie/re-perfusion) montrent des résultats préliminaires encourageants sur la CRS qui demandent également à être confirmés auprès de tennismen.



**Figure 8.** Vue de la salle hypoxique au Centre National d'Entraînement de la FFT.

Il n'existe pas une forme unique d'entraînement en altitude pouvant être recommandée pour améliorer le plus efficacement les facteurs clés de la performance au tennis que sont la capacité aérobie et CRS. En revanche, la combinaison de différentes formes d'entraînement (soit l'exposition chronique passive et l'entraînement à très haute intensité en hypoxie pour maximiser la capacité de transport de l'O<sub>2</sub> et son utilisation au niveau du muscle, respectivement) est certainement une stratégie efficace. Une période de 2 semaines consistant à « *vivre en altitude et s'entraîner au niveau de la mer et en altitude* » (faible « dose hypoxique »  $\geq 200$  h) en milieu de saison d'un championnat élite de hockey sur gazon a permis d'améliorer les qualités physiques 'aérobie' et 'anaérobie' des joueurs, comparativement à un entraînement « *vivre en altitude et s'entraîner au niveau de la mer* » (avec répétition de sprints réalisés au niveau de la mer) ou un entraînement 'classique' au niveau de la mer. Au-delà d'une augmentation de la performance aérobie (+20-40% sur le « *test YYIR2* ») susceptible d'être maintenue jusqu'à 20 jours post-intervention dans les deux groupes expérimentaux, la supériorité de la méthode « *vivre en*



*altitude et s'entraîner au niveau de la mer et en altitude* » était surtout visible sur la CRS. En effet, les gains immédiatement après l'intervention « *vivre en altitude et s'entraîner au niveau de la mer et en altitude* » (temps cumulés lors du test de sprints répétés: -3.6 contre -1.9%, respectivement) étaient doubles, et maintenus dans ce groupe uniquement pendant au moins 3 semaines après l'intervention. Ces résultats nécessitent confirmation auprès d'une population de tennismen.

#### **4. Recommandations pratiques**

1. L'utilisation des interventions récentes (HIIT, CRS, RSH), à haut niveau d'engagement et de sollicitation, appelle de la méthode. Un niveau de vigilance quant à la superposition des contenus d'entraînement et de ses effets sur l'état général des athlètes, notamment en terme de fatigue, doit contribuer à équilibrer les influences sur l'activité neurovégétative des athlètes (Schmitt et al. 2015). Pour ce faire nous distinguerons trois types d'efforts qualifiés selon trois zones. La zone 1 correspond à tous les efforts inférieurs ou égaux à SV1, La zone 2 est comprise entre SV1 et SV2, et la zone 3 intervient au-delà de SV2, et englobe HIIT, CRS et RSH. Il s'avère que la plupart des situations d'entraînement (courses multidirectionnelles proche de la ligne de fond de court) sur le court qui intègrent de la répétition de frappe avec de l'intensité amènent les joueurs proches de SV2 (Reid et al. 2008). Par conséquent, nous invitons à reconsidérer des séances à dominante technique, avec de l'intensité sur peu de frappes n'excédant pas 7 s, avec 20 s de récupération entre les répétitions, afin de ne pas entamer les réserves glycolytiques particulièrement mobilisées à ces intensités. De même, l'analyse de l'activité en compétition renforce l'hypothèse que des formes de points joués avec service doivent permettre de maintenir les joueurs proches de la zone 1 avec des effets moins délétères sur la fatigue.

Une approche « polarisée » de l'entraînement, en intégrant ~ 75% de l'entraînement total qui serait réalisé à faible intensité aérobie (zone 1), et 10-15% à haute, voire très haute intensité (zone 3), a été suggérée pour une distribution optimale des intensités pour les athlètes de haut niveau qui s'expriment dans des activités à haute intensité (Laursen, 2010). Même si cette répartition paraît impossible à tenir compte tenu des habitudes et des bases d'exercices type tennis on doit, nous semble-t-il, s'en inspirer aussi pour tenir compte des observations de Baiget et al. (2015) qui ont analysé l'impact énergétique sur des joueurs en compétition. En effet, ils ont identifié que les joueurs passent 77% ( $\pm 25\%$ ) du temps dans la zone à faible intensité (Zone 1), 20% ( $\pm 21\%$ ) dans la zone modérée (Zone 2), et 3% ( $\pm 5\%$ ) dans la zone 3. Un simple suivi de la FC doit permettre de satisfaire cette démarche. Sans une utilisation permanente, l'identification des impacts énergétiques selon les types de situations régulièrement pratiquées participe à contrôler l'équilibre des influences neuro-végétatives inhérentes aux contenus d'entraînement, à défaut de pouvoir effectuer un suivi régulier des niveaux d'énergie à partir de la variabilité de la FC. Les variations de niveaux d'énergie permettent d'estimer un niveau de fatigue (Schmitt al. 2013). Cette dynamique des charges d'entraînement, issue d'expériences de terrain et reprise

et validée scientifiquement (Laursen, 2010), apparaît déterminante pour s'inscrire dans une continuité du processus de développement, et éviter des arrêts brutaux, soit des capacités physiques, soit directement de la performance tennis.

2. La réalisation de tests spécifiques incrémentaux sur le terrain de tennis incluant des éléments du jeu (comme ceux présentés dans ce chapitre) et nécessitant des capacités physiques, techniques et cognitives bien développées sont à inclure dans l'évaluation régulière (*c-à-d.* détection, avant vs. après une période d'entraînement, l'utilisation d'aide ergogénique comme des suppléments ou la consommation de boissons énergisantes) du niveau de condition physique du joueur dans un contexte approprié au jeu. Un avantage de ces tests est d'inclure une évaluation technique (vitesse/précision des frappes de balles) du joueur comme lors de « **TEST** » (Brecht et al. 2016), notamment lorsque celui-ci doit faire face à l'apparition de la fatigue (**Figures 9-10**). Ils peuvent donc être associés au travail d'éléments techniques dans diverses situations. A partir de « **TEST** », on peut poursuivre des objectifs à dominante technique (Zone 1 et 2), ou des objectifs à dominante énergétique (Zone 3), toujours en associant une rigueur dans l'exécution des frappes avec des feedbacks sur la vitesse et la précision (**Tableau 1**). Pour la Zone 1, par exemple, l'objectif serait de maintenir la session aussi longtemps que possible au palier équivalent à 70%  $VO_{2max}$ , avec 2 ou 3 séries de 5 à 10 min. Et si on vise la zone 3, on préférera des intervalles de frappes plus courts (15 s à 1 min) entrecoupés par du repos passif (15 à 30 s). Dans tous les cas, on évitera de descendre en dessous de 40% de balles dans la cible définie (Lyons et al. 2013) pendant « **TEST** ».

**Tableau 1 – Réponses physiologiques au cours de la passation de « TEST » chez un joueur élite**

Palier	Nb balles/min	FC (bpm)	Lactate (mmol.l <sup>-1</sup> )	VO <sub>2</sub> (ml.min <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> )	VCO <sub>2</sub> (ml.min <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> )	VE (l.min <sup>-1</sup> )
1	10	131		40.2	36.6	68
2	12	140	1	41.5	39.0	74
3	14	154		43.9	42.7	79
4	16	159	1.2	45.1	45.7	84
5	18	165		47.6	48.8	87
6	20	171	1.4	50.4	51.2	95
7	22	175		53.2	53.3	98
8	23	180	2.1	55.6	57.1	104
9	24	183		57.4	61.2	115
10	25	184	4.2	59.6	65.2	125
11	26	188		60.5	68.1	133
12	27	189		61.5	70.2	145
13	28	191	11.8	62.2	74.1	160

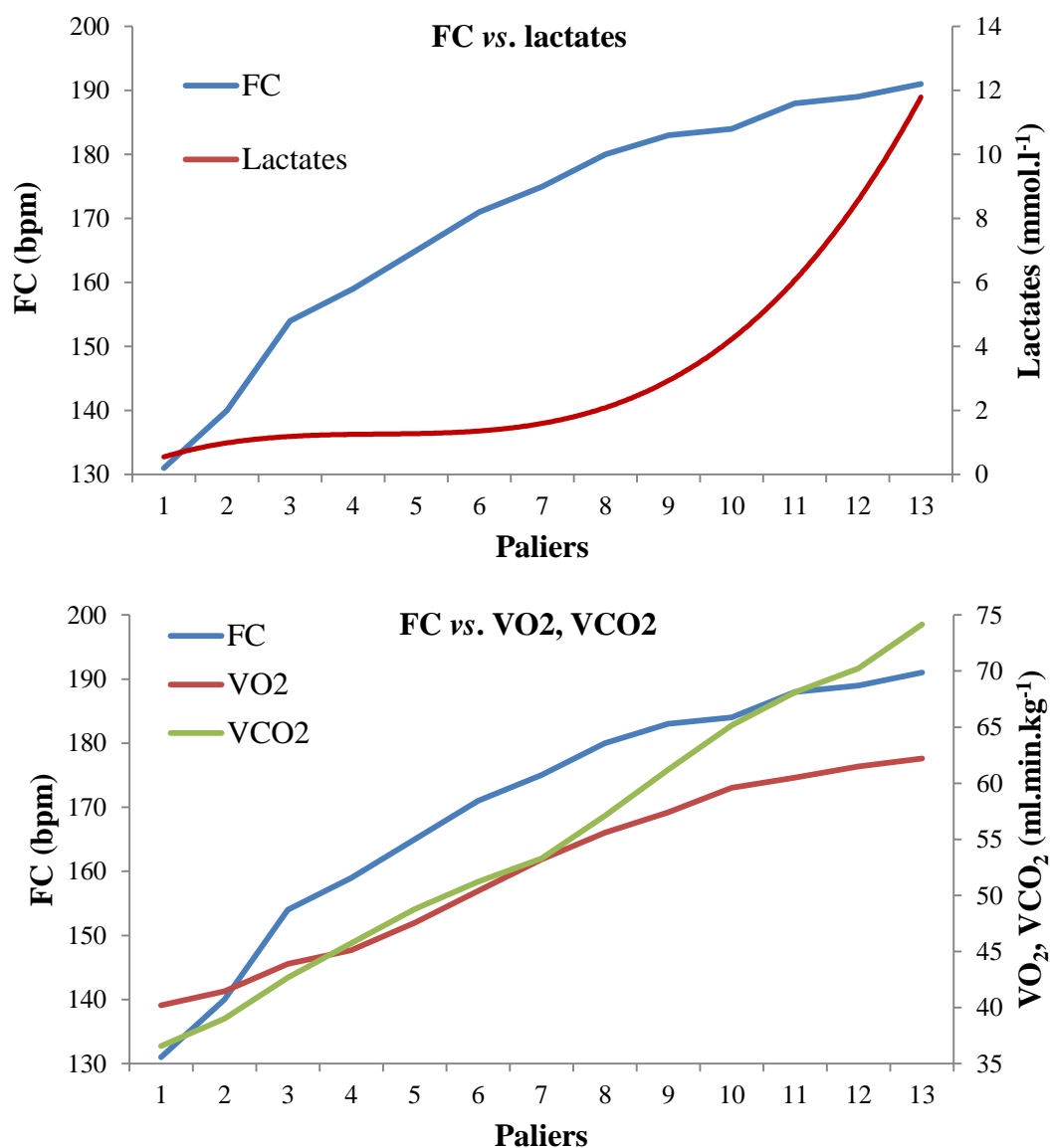
FC, fréquence cardiaque; VO<sub>2</sub>, consommation d'oxygène; VCO<sub>2</sub>, consommation de dioxyde de carbone; VE, ventilation. Taille: 185 cm; Poids: 82 kg.

*Intensité bleu:* zone aérobie; échauffement, récupération. L'implication physiologique n'est pas en relation avec une bonne performance tennis (vitesse et précision); manque d'implication du fait de la faible intensité de l'exercice.

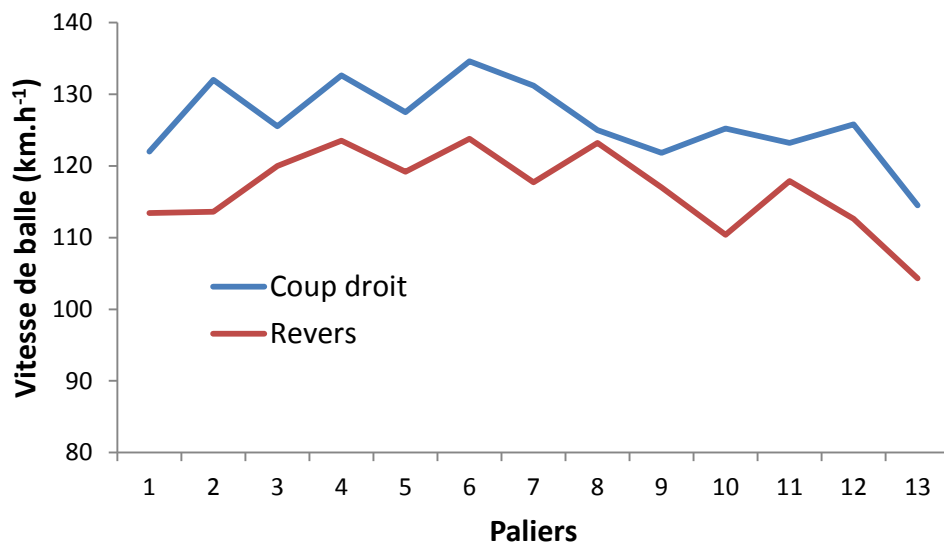
*Intensité verte:* zone aérobie stricte, en dessous du début de production lactique (SL1) et de SV1: travail d'endurance aérobie; la demande d'implication dans la performance tennis (vitesse et précision) peut être forte à maximale.

*Intensité jaune:* zone entre les seuils lactiques 1 et 2 (ou SV2): la demande technique est très forte mais la production d'acide lactique commence à être présente (action importante du pouvoir tampon musculaire); zone de développement aérobie par l'augmentation des transporteurs d'ions H<sup>+</sup>.

*Intensité orange:* au-dessus du seuil lactique 2 et SV2: zone d'accumulation lactique; baisse du niveau de performance tennistique due à l'acidose musculaire et l'hyperventilation. Travail du niveau de la vitesse maximale aérobie.



**Figure 9** - Evolution de la fréquence cardiaque (FC) en fonction de la lactatémie (panel du haut) et des consommations d'oxygène (VO<sub>2</sub>) et de dioxygène (VCO<sub>2</sub>) (panel du bas) lors de la passation de « *TEST* » chez un joueur élite



**Figure 10** - Vitesse de balle en coup droit ou revers lors de la passation de « *TEST* » chez un joueur élite

3. La combinaison des formes d'entraînement par intervalles (HIIT) et l'entraînement en sprints répétés serait une approche particulièrement efficace pour améliorer harmonieusement  $VO_{2max}$  et CRS, et en retour la résistance à la fatigue. En effet, la récupération se trouverait facilitée entre les efforts du fait de l'amélioration de l'aptitude aérobie ( $VO_{2max}$  et seuil lactique), de la vitesse de resynthèse de la phosphocréatine et de l'efficacité de la capacité tampon. Il convient alors d'inclure:

a. Des séances HIIT qui amélioreraient la capacité à récupérer entre les sprints (en particulier si la finalité est d'améliorer la résistance à la fatigue). Des séances HIIT à haute intensité (*c-à-d.* 3-4 séries × [3 répétitions × 80-90%  $VO_{2max}$  ou 90-95%  $FC_{max}$ ], entrecoupées de périodes de repos [1-2 min] plus courtes que celles d'activité [2-4 min]) seraient efficaces.

b. Des formes d'entraînement basées sur la répétition d'efforts maximaux de courte durée (*c-à-d.* 3-4 séries × [5-12 répétitions × 4-8-s sprints en navette], avec 15-30 s de repos entre les répétitions, 2-4 min entre les séries).

4. L'utilisation de méthodes d'entraînement en altitude, de manière isolée ou en combinaison, pourrait permettre de 'booster' le potentiel physique du joueur de tennis. Une exposition chronique passive (200-250 h soit 14-18 jours à raison de 12-14 h par jour) et l'entraînement à très haute intensité en hypoxie tel que les « sprints répétés en hypoxie » (2-3 fois par semaine sur 2-4 semaines) pour maximiser la capacité de transport de l' $O_2$  et son utilisation au niveau du muscle semblent particulièrement appropriés. Toutefois, pour espérer des gains supérieurs lorsque l'entraînement est réalisé sous hypoxie *versus* au niveau de la mer il conviendra d'utiliser des expositions modérées (entre 2000 et 3000 m). Les ratios

exercice : récupération devront être adaptés selon les effets recherchés (adaptations oxydatives vs. glycolytiques). La finalité étant de produire un niveau de stress métabolique suffisant mais non exagéré.

### **Conclusion**

Au tennis, l'activité est intermittente et correspond à la répétition de périodes d'exercice brèves et intenses entrecoupées de périodes de récupération plus ou moins complètes. L'aptitude aérobie et la capacité à réitérer des efforts intenses sont des déterminants importants de la performance physique du joueur. A ce jour, plusieurs tests de terrain visant à déterminer la capacité physique et/ou technique du joueur et sa capacité à répéter des efforts intenses dans des conditions standardisées ont été proposés. Du fait des exigences du jeu et des profils de joueurs variés notamment, il n'existe pas de procédures optimales. L'entraînement à base d'exercices intermittents à haute intensité et de sprints répétés semble efficace pour améliorer la performance physique du joueur (tests physiques isolés), même s'il reste difficile de préciser son impact sur son comportement en match. L'efficacité de tels programmes d'entraînement dépend étroitement de la nature (*c-à-d.* ratio exercice : récupération visant des adaptations davantage glycolytiques vs. oxydatives en lien avec le style de jeu du joueur) de celui-ci. Il est donc difficile de formuler des recommandations strictes. Avec le développement d'équipements hypoxiques dans les académies de tennis (*p. ex.* salle de 120 m<sup>2</sup> au Centre National d'Entraînement de la FFT) différentes interventions innovantes (*p. ex.* sprints répétés en hypoxie) peuvent être ciblées pour optimiser le développement des déterminants de la performance.

## Références

- Baiget E, Fernández-Fernández J, Iglesias X, Vallejo L, Rodríguez FA. On-court endurance and performance testing in competitive male tennis players. *J Strength Cond Res* 2014;28:256-264.
- Baiget E, Fernández-Fernández J, Iglesias X, Rodríguez FA. Tennis play intensity distribution and relation with aerobic fitness in competitive players. *PLoS One* 2015;10:e0131304.
- Baiget E, Iglesias X, Rodríguez FA. Aerobic fitness and technical efficiency at high intensity discriminate between elite and subelite tennis players. *Int J Sports Med* 2016;37:848-854.
- Bangsbo J, Iaia FM, Krstrup P. The Yo-Yo intermittent recovery test: a useful tool for evaluation of physical performance in intermittent sports. *Sports Med* 2008;38:37-51.
- Banzer W, Thiel C, Rosenhagen A, Vogt L. Tennis ranking related to exercise capacity. *Br J Sports Med* 2008;42:152-154.
- Bentley DJ, Newell J, Bishop D. Incremental exercise test design and analysis: implications for performance diagnostics in endurance athletes. *Sports Med* 2007;37:575-586.
- Billat LV. Interval training for performance: a scientific and empirical practice: special recommendations for middle- and long-distance running. Part II: anaerobic interval training. *Sports Med* 2001;31:75-90.
- Bishop DJ, Edge J, Thomas C, Mercier J. Effects of high-intensity training on muscle lactate transporters and postexercise recovery of muscle lactate and hydrogen ions in women. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 2008;295:R1991-R1998.
- Bishop D, Girard O, Mendez-Villanueva A. Repeated-sprint ability—part II: recommendations for training. *Sports Med* 2011;41:741-756.
- Blondel N, Berthoin S, Billat V, Lensele G. Relationship between run times to exhaustion at 90, 100, 120, and 140% of  $vVO_{2max}$  and velocity expressed relatively to critical velocity and maximal velocity. *Int J Sports Med* 2001;22:27-33.
- Brocherie F, Millet GP, Hauser A, Steiner T, Rysman J, Wehrin JP, Girard O. "Live High-Train Low and High" hypoxic training improves team-sport performance. *Med Sci Sports Exerc* 2015;47:2140-2149.
- Brocherie F, Girard O, Faiss R, Millet GP. Effects of repeated-sprint training in hypoxia on sea-level performance: a meta-analysis. *Sports Med* 2016; submitted.
- Brechbuhl C, Girard O, Millet GP, Schmitt L. On the use of a Test to Exhaustion Specific to Tennis (TEST) with ball hitting by elite players. *PLoS One* 2016 11:e0152389.
- Buchheit M, Haydar B, Ahmaidi S. Repeated sprints with directional changes: do angles matter? *J Sports Sci* 2012;30:555-562.
- Buchheit M, Laursen PB. High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle: Part I: cardiopulmonary emphasis. *Sports Med* 2013a;43:313-338.
- Buchheit M, Laursen PB. High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle. Part II: anaerobic energy, neuromuscular load and practical applications. *Sports Med* 2013b;43:927-954
- Brue F. Une variante du test progressif et maximal de Léger-Boucher: le test de VMA derrière cycliste (test VMA). Colloque médico-technique de la fédération française d'athlétisme, 1985; 25-30.
- Buchheit M. The 30-15 intermittent fitness test: accuracy for individualizing interval training of young intermittent sport players. *J Strength Cond Res* 2008;22:365-374.
- Buchheit M, Haydar B, Ahmaidi S. Repeated sprints with directional changes: do angles matter ? *J Sports Sci* 2012;30:555-562.
- Chelly SM, Denis C. Leg power and hopping stiffness: relationship with sprint running performance. *Med Sci Sports Exerc* 2001 33:326-333.

- Coutts AJ. Working fast and working slow: the benefits of embedding research in high performance sport. *Int J Sports Physiol Perform* 2016;11:1-2.
- Davey PR, Thorpe RD, Williams C. Fatigue decreases skilled tennis performance. *J Sports Sci* 2002;20:311-318.
- Dawson B. Repeated-sprint ability: where are we? *Int J Sports Physiol Perform* 2012;7:285-289.
- Dupont G, Millet GP, Guinhouya C, Berthoin S. Relationship between oxygen uptake kinetics and performance in repeated running sprints. *Eur J Appl Physiol* 2005;95:27-34.
- Edge J, Bishop D, Goodman C. The effects of training intensity on muscle buffer capacity in females. *Eur J Appl Physiol* 2006;96:97-105.
- Faiss R, Girard O, Millet GP. Advancing hypoxic training in team sports: from intermittent hypoxic training to repeated sprint training in hypoxia. *Br J Sports Med* 2013;47:45-50.
- Fernandez J, Mendez-Villanueva A, Pluim BM. Intensity of tennis match play. *Br J Sports Med* 2006;40:387-391.
- Fernandez-Fernandez J, Kinner V, Ferrauti A. The physiological demands of hitting and running in tennis on different surfaces. *J Strength Cond Res* 2010;24:3255-3264.
- Fernandez-Fernandez J, Zimek R, Wiewelhove T, Ferrauti, A. High-Intensity Interval Training vs. Repeated-Sprint Training in Tennis. *J Strength Cond Res* 2012;26:53-62.
- Fernandez-Fernandez J, Sanz-Rivas D, Kovacs M, Moya M. In-season effect of a combined repeated sprint and explosive strength training program on elite junior tennis players. *J Strength Cond Res* 2015;29:351-357.
- Fernandez-Fernandez J, Sanz-Rivas D, Sarabia JM, Moya M. The effects of sport-specific drills training or high-intensity interval training in young tennis players.
- Ferrauti A, Kinner V, Fernandez-Fernandez J. The Hit & Turn Tennis Test: An acoustically controlled endurance test for tennis players. *J Sports Sci* 2011;29:485-494.
- Foster C, Cotter HM. Blood lactate, respiratory, heart rate markers on the capacity for sustained exercise. Dans: Maud PJ, Foster C, eds. *Physiological assessment of human fitness*. 2nd ed: Champaign, IL, Human Kinetics, 2006:63-76.
- Gatterer H, Philippe M, Menz V, Mosbach F, Faulhaber M, Burtscher M. Shuttle-run sprint training in hypoxia for youth elite soccer players: a pilot study. *J Sports Sci Med* 2014;13:731-735.
- Gibala MJ, McGee SL. Metabolic adaptations to short-term high-intensity interval training: A little pain for a lot of gain? *Exerc Sport Sci Rev* 2008;36:58-63.
- Girard O, Vaseux D, Millet GP. Comparaison de l'efficacité de trois modalités d'entraînement chez des joueurs de tennis. *Sci Sports* 2005;20:45-47.
- Girard O, Chevalier R, Leveque F, Micallef J-P, Millet GP. Specific incremental field test for aerobic fitness in tennis. *Br J Sports Med* 2006;40:791-796.
- Girard O, Millet GP. Physical determinants of tennis performance in competitive teenage players. *J Strength Cond Res* 2009;23:1867-1872. *Int J Sports Physiol Perf* 2016, sous presse.
- Girard O, Eicher F, Chevalier R. Comparaison de trois modalités d'entraînement en intermittent sur la répétition de sprints au tennis. *Regards croisés sur le tennis* (édité par E. Bayle & L. Cronier), AFRAPS, 2009;293-302.
- Girard O, Mendez-Villanueva A, Bishop D. Repeated-sprint ability - Part I. *Sports Med* 2011;41:673-694.
- Girard O, Christian R, Racinais S, Périard J. Heat stress does not exacerbate tennis-induced alterations in physical performance. *Br J Sports Med* 2014;48:39-44.

- Girard O, Durussel A. Improving physical determinants of tennis performance in teenage players with repeated sprint training: are directional changes adding value ? *J Med Sci Tennis* 2015;20:129-133.
- Gore CJ, Sharpe K, Garvican-Lewis LA, Saunders PU, Humberstone CE, Robertson EY, *et coll.*, Altitude training and haemoglobin mass from the optimised carbon monoxide rebreathing method determined by a meta-analysis. *Br J Sports Med* 2013;47:31-39.
- Impellizzeri FM, Marcora SM, Castagna S, Reilly T, Sassi A, Iaia FM, Rampini E. Physiological and performance effects of generic versus specific aerobic training in soccer players. *Int J Sports Med* 2006;27:483-492.
- König D, Huonker M, Schmid A, Halle M, Berg A, Keul J. Cardiovascular, metabolic and hormonal parameters in professional tennis players. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33:654-658.
- Kovacs M. Tennis physiology. Training the competitive athlete, *Sports Med* 2007;37:189-198.
- Krustrup P, Hellsten Y, Bangsbo, J. Intense interval training enhances human skeletal muscle oxygen uptake in the initial phase of dynamic exercise at high but not at low intensities. *J Physiol* 2004;559:335-345.
- Laursen PB. Training for intense exercise performance: high-intensity or high-volume training? *Scand J Med Sci Sports* 2010;20:1-10.
- Léger L, Boucher R. An indirect continuous running multistage field test, the Université de Montréal Track Test. *Can J Appl Sports Sci* 1980;5:77-84.
- Léger L, Lambert, J. A maximal multistage 20-m shuttle run test to predict  $VO_{2max}$ . *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1982;49:1-12.
- Lyons M, Al-Nakeeb Y, Hankey J, Nevill A. The effect of moderate and high-intensity fatigue on groundstroke accuracy in expert and non-expert tennis players. *J Sports Sci Med* 2013;12:298-308.
- McLean BD, Gore CJ, Kemp J. Application of 'live low-train high' for enhancing normoxic exercise performance in team sport athletes. *Sports Med* 2014;44:1275-1287.
- Millet GP, Candau R, Fattori P, Bignet F, Varray A.  $VO_2$  responses to different intermittent runs at velocity associated with  $VO_{2max}$ . *Can J Appl Physiol* 2003;28:410-423.
- Millet GP, Libicz S, Borrani F, Fattori P, Bignet F, Candau R. Effects of increased intensity of intermittent training in runners with differing  $VO_2$  kinetics. *Eur J Appl Physiol* 2003;90:50-57.
- Morin JB, Samozino P, Bonnefoy R, Edouard P, Belli A. Direct measurement of power during one single sprint on treadmill. *J Biomech* 2010;43:1970-1975.
- Morton JP, Cable NT. Effects of intermittent hypoxic training on aerobic and anaerobic performance. *Ergonomics* 2005;48:1535-46.
- Murphy AP, Duffield R, Kellett A, Reid M. A comparison of the perceptual and technical demands of tennis training, simulated match play, and competitive tournaments. *Int J Sports Physiol Perf* 2016;11:40-47.
- Piovannini M. Post-match fatigue analysis using repeated sprint ability in tennis players. *J Med Sci Tennis* 2015;20:134-136.
- Rakobowchuk M, Tanguay S, Burgomaster KA, Howarth KR, Gibala MJ, MacDonald M. Sprint interval and traditional endurance training induce similar improvements in peripheral arterial stiffness and flow-mediated dilation in healthy humans. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 2008;295:236-242.
- Reid M, Duffield R, Dawson B, Baker J, Crespo M. Quantification of the physiological and performance characteristics of on-court tennis drills. *Br J Sports Med* 2008;42:146-151.
- Santos EL, Giannella-Neto A. Comparison of computerized methods for detecting the ventilatory thresholds. *Eur J Appl Physiol* 2004;93:315-324.



- Schmitt L, Regnard J, Desmarests M, Mauny F, Mourot L, Fouillot JP, Coulmy N, Millet GP. Fatigue shifts and scatters heart rate variability in elite endurance athletes. *PLoS one* 2013;8:e71588.
- Schmitt L, Regnard J, Parmentier AL, Mauny F, Mourot L, Coulmy N, Millet GP. Typology of "Fatigue" by Heart Rate Variability Analysis in Elite Nordic-skiers. *Int J Sports Med* 2015;36:999-1007.
- Seiler S. What is best practice for training intensity and duration distribution in endurance athletes? *Int J Sports Physiol Perform* 2010;5:276-291
- Srihirun K, Boonrod W, Mickleborough TD. The effect of on-court vs. off-court interval training on skilled tennis performance and tolerance to fatigue in young male tennis players. *J Exerc Physiol* 2014;17:11-20.
- Smekal G, Pokan R, von Duvillard SP, Baron R, Tschan H, Bachl N. Comparison of laboratory and 'on-court' endurance testing in tennis. *Int J Sports Med* 2000;21:242-249.
- Talbot P. Filières énergétiques et temps réels de jeu. *Revue EPS* 1990; 226:24-26.
- Taylor J, Macpherson T, Spears I, Weston M. The effects of repeated-sprint training on field-based fitness measures: a meta-analysis of controlled and non-controlled trials. *Sports Med* 2015;45:881-891.
- Ulbricht A, Fernandez-Fernandez J, Mendez-Villanueva A, Ferrauti A. The relative age effect and physical fitness characteristics in German male tennis players. *J Sports Sci Med* 2015 ;14 :634-642.
- Vergauwen L, Spaepen AJ, Lefevre J, Hespel P. Evaluation of stroke performance in tennis. *Med Sci Sports Exerc* 1998;30:1281-8.
- Weber K, Hollmann W. Neue Methoden zur Diagnostik und Trainingssteuerung der tennisspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit. Dans: *Gabler HaZ B. ed Talentsuche und Talentförderung im Tennis*. Ahrensberg: Czwalina, 1984:186-209.
- Ziemann E, Sledziewska E, Grzywacz T, Gibson AL, Wierzba TH. Body composition and physical capacity of elite adolescent female tennis players. *Georgian Med News* 2011;196-197:19-27.

## ***Chapitre 10***

### ***Article 5- Altérations techniques pendant un test de terrain incrémental chez des joueurs élite***

**Article 5- Technical alterations during an incremental field test in elite male tennis players.**

Brechbuhl C, Girard O, Millet GP, Schmitt L. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 49(9), 1917-1926.

# Technical Alterations during an Incremental Field Test in Elite Male Tennis Players

CYRIL BRECHBUHL<sup>1,2</sup>, OLIVIER GIRARD<sup>2,3</sup>, GRÉGOIRE P. MILLET<sup>2</sup>, and LAURENT SCHMITT<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>French Tennis Federation, Stade Roland-Garros, Paris, FRANCE; <sup>2</sup>Faculty of Biology and Medicine, ISSUL, Institute of Sport Sciences, University of Lausanne, Lausanne, SWITZERLAND; <sup>3</sup>Aspetar Orthopaedic and Sports Medicine Hospital, Athlete Health and Performance Research Centre, Doha, QATAR; and <sup>4</sup>National Ski-Nordic Center, Premanon, Les Roussets, FRANCE

## ABSTRACT

BRECHBUHL, C., O. GIRARD, G. P. MILLET, and L. SCHMITT. Technical Alterations during an Incremental Field Test in Elite Male Tennis Players. *Med. Sci. Sports Exerc.*, Vol. 49, No. 9, pp. 1917–1926, 2017. **Purpose:** We investigated technical and physiological responses along with their relationships during an incremental field test to exhaustion specific to tennis (TEST) in elite players. **Methods:** Twenty male elite tennis players completed TEST, which consisted of hitting alternatively forehand and backhand strokes at increasing ball frequency (ball machine) every minute. Ball accuracy (BA), ball velocity (BV), and tennis performance (TP) index (TP = BA x BV) were determined by radar and video analysis for each stroke, in addition to cardiorespiratory responses and blood lactate concentrations.

**Results:** At low intensities (less than 80% of maximal oxygen uptake [ $\dot{V}O_{2max}$ ]), technical performance was steady. From 80% to 100% of  $\dot{V}O_{2max}$ , significant and steady decreases in BV (-9.0% and -13.3%;  $P = 0.02$  and  $P = 0.002$ ), BA (-19.4% and -18.4%; both  $P < 0.001$ ), and TP (-27.4% and -29.15%; both  $P = 0.002$ ) occurred for forehands and backhands, respectively. Changes in TP and blood lactate concentration from 60% to 100% of  $\dot{V}O_{2max}$  were inversely correlated ( $r = -0.51$ ,  $P = 0.008$ ). BV was 5.2% higher ( $P = 0.042$ ) for forehand versus backhand, and there was no difference between strokes for both BA ( $P = 0.930$ ) and TP ( $P = 0.536$ ).

**Conclusion:** Technical alterations (i.e., decrease in BV, BA, and TP) in elite players undergoing TEST only occurred at high intensity (>80% of  $\dot{V}O_{2max}$ ), presumably because of the use of compensatory strategies to overcome fatigue. Above this intensity, all technical indices decreased steadily until exhaustion, independently of the stroke nature. **Key Words:** GROUNDSTROKES, BALL VELOCITY, BALL ACCURACY, FOREHAND, BACKHAND

For the past 30 yr, tennis has evolved from a sport in which players' skill proficiency (technique) was the main determinant of performance into a game where physical attributes likely play a more preponderant role. Nowadays, tennis is characterized by intense physical demands (24,27) coupled with rapid perceptual-motor processing (36). Tennis is an explosive sport based on power, strength, and speed, where 210 km.h<sup>-1</sup> serves are common (24). In addition to producing elevated ball velocity (BV, km.h<sup>-1</sup>), maintaining ball accuracy (BA, i.e., number of errors, %) during intense periods also is a key component for winning the faster-paced modern game (24).

A variety of field-based procedures have been developed during the past two decades to assess physical performance ability of elite tennis players (3,12,15,18,35), whereas other

tennis tests also include an evaluation of ground stroke production (10,25,39). In a pioneer study, Vergauwen et al. (39) introduced the Leuven tennis performance test procedure to evaluate ground stroke performance in various tactical situations typically experienced during competitions. These authors notably reported an increase in ground stroke errors during defensive rallies after a 2-h strenuous training session in well-trained players (39). Although informative, this test procedure requires advanced video analysis techniques for determining ball placement and the use of three different tactical situations initiated by a light stimulus. Such expensive and quite complicated system of video cameras and digitization may not be readily accessible to most tennis academies.

In numerous follow-up protocols, rather simple BA indices such as the ability to place the ball on a target located in different zones on the tennis court have been used to evaluate stroke production (3,10,35,39). Errors made by a player in relation to all shots performed in a field test (percentage of balls in the zone) is a good predictor of successful tennis performance (TP) (32). As movement velocity depends on the accuracy requirements of the task, an increased movement speed (i.e., players under time pressure) would inevitably lead to decreased motor accuracy (16,31). This implies that stroke production must be determined from simultaneous

Address for correspondence: Grégoire P. Millet, Ph.D., Faculty of Biology and Medicine, ISSUL, Institute of Sport Sciences, University of Lausanne, Lausanne, Switzerland; E-mail: gregoire.millet@unil.ch.

Submitted for publication October 2016.

Accepted for publication April 2017.

0195-9131/17/4909-1917/0

MEDICINE & SCIENCE IN SPORTS & EXERCISE®

Copyright © 2017 by the American College of Sports Medicine

DOI: 10.1249/MSS.0000000000001303

measurements of BV and BA. To meet the velocity–accuracy trade-off theory proposed by Fitts (17), it is likely that fatigued tennis players may well reduce BV to maintain BA. In tennis, however, it is still unclear if players prioritize accuracy or velocity when physically exhausted. For example, Rota et al. (33) illustrated a management of the speed–accuracy trade-off in favor of the velocity in response to intense intermittent exercise.

Understanding how fatigue is manifested represents a fascinating topic for sports scientists, exercise physiologists, athletes, and coaches (19,20,30). Fatigue effects on tennis stroke production are still controversial, with no clear relative importance of decrement in BV versus BA under fatigue (23) or even the absence of any changes (26). Although difficult, such differentiation is important as positioning to the ball (i.e., small footwork) as part of the technical approach, in particular, is known to rise oxygen cost (5). For instance, professional tennis players are able to make movement adjustments to effectively perform complex technical strokes such as the serve throughout 3-h long matches played on grass courts (26). Although information about changes in ground stroke performance during official competition in elite players is scarce, global approaches (i.e., averaged values for each set [26]) may not readily reflect changes that occur during the most intense periods of a game (i.e., succession of intense rallies or decisive points). Interestingly, at least two recent reports (3,10) indicate that incremental fatigue is associated with decrease in ground stroke production. In the aforementioned studies, however, no measure of BV was included as stroke production assessment was restricted to BA, and hence a speed–accuracy trade-off could not be discounted.

Several limitations of the available tennis tests need to be emphasized. First, although there have been previous attempts to evaluate forehand (f) and backhand (b) strokes separately during the completion of tennis-specific tests, BV and BA have not always been simultaneously measured (i.e., evaluation of BA but not BV) (3,10,15). Second, the association of physiological load with ground stroke production has only occasionally been investigated (3). Ascertaining the nature of such relationship would considerably increase the practical value of a given test. Third, the performance level of tested players varies greatly across studies, often with cohorts of club-level players, which considerably limits the generalization of findings to a population of elite players.

We have recently developed an incremental (by adjusting ball frequency [BF]) test to exhaustion specific to tennis (TEST) that consists of hitting alternatively forehands and backhands into target areas (6). TEST simulates some of the components of actual match play (i.e., use of the tennis court dimensions, combination of specific footwork and hitting actions) and uses a reliable ball throwing machine (8), allowing standardized conditions for appropriately testing highly skilled individuals. To date, however, technical performance during TEST completion and its relationship with physiological responses have not been described.

Our aim was to determine alterations in BV and BA, for forehand and backhand strokes separately, during TEST

completion by elite male players. Although decrements in BV and BA with increase in exercise intensity were anticipated, we hypothesized that it would be (i) to a greater extent above the second ventilatory threshold (VT2) as previously reported (2) and (ii) with similar magnitude for forehand and backhand strokes.

## METHODS

### Ethic Statement

Both the players and their parents (for minors) provided written informed consent for the study after the procedures, and potential risks associated with participation in the study were fully explained. The scientific committee of the French Tennis Federation approved the study that was performed in accordance with the ethical standards reported (21) and conformed to the recommendations of the Declaration of Helsinki.

### Participants

Twenty high-level competitive male tennis players (mean T SD; age =  $18.0 \pm 3.2$  yr, stature =  $182.8 \pm 7.3$  cm, body mass =  $72.7 \pm 7.2$  kg) volunteered to participate in the study. They were all members of the national teams of the French Tennis Federation (International Tennis Number 1 [elite]). Players were either members of the Association of Tennis Professionals (ATP) (two in top 100, two in top 200, two in top 500, and nine in top 1000) or of the International Tennis Federation (ITF) Juniors ranking (Participating to Grand Slam) at the time of experiments (2013–2015). Two players have now reached the top 30 ATP. The mean training background of the players was  $12.0 \pm 3.7$  yr, and the training regimen was  $6$  d. $\text{wk}^{-1}$  with a weekly training volume of  $27.0 \pm 3.1$  h. Players were focusing  $16.1 \pm 1.2$  h. $\text{wk}^{-1}$  on tennis-specific training (i.e., technical and tactical skills), but their fitness routine also included aerobic and anaerobic (i.e., on-court and off-court exercises;  $4.4 \pm 0.3$  h. $\text{wk}^{-1}$ ) conditioning as well as strength ( $7.2 \pm 1.5$  h. $\text{wk}^{-1}$ ) training. During the 3 months before testing (November), they participated regularly to official tennis competitions (i.e., “ITF Juniors” and “ITF Futures” or ATP tournaments) for a total of 5–10 matches monthly.

### Players’ Ranking

The international tennis ranking (ATP and ITF Junior) was used to rank players from 1 to 20 in our population sample. This ranking was confirmed by the professional national coaches.

### Experimental Design

All participants performed a newly developed incremental protocol TEST, as recently described (6). For all players, TEST was conducted under similar standard environmental conditions (temperature,  $\sim 20^\circ\text{C}$ ; relative humidity,  $\sim 50\%$ ) on an indoor tennis court (i.e., GreenSet® surface; GreenSet Worldwide S.L., Barcelona, Spain). All participants were given

written and verbal instructions to report for testing in a well-rested, well-hydrated, and well-nourished state and to refrain from eating at least 2 h before testing. They were told to refrain from strenuous training and to maintain their usual nutritional and hydration habits the day before the test. One week before the main experimental trial, a familiarization session was scheduled allowing TEST requirements to be explained.

## Experimental Procedures

**TEST.** TEST procedure consisted of hitting balls thrown at constant velocity (mean = 86 km.h<sup>-1</sup>, coefficient of variation for ball speed = 1.7% and 1.5% for right and left corners of the baseline, respectively), alternating forehand and backhand strokes (Fig. 1A), by using a “Hightof” ball machine. The reference points for the effect were 8.39 m from the net and 2.70 m from lateral line for the right side and 2.83 m for the left side. The accuracy of the machine is similar on the right and left sides (0.63 ± 0.39 vs 0.63 ± 0.34 m). We also verified that

the accuracy is constant and does not change with increasing BF. Both the accuracy and the reliability of this new tennis ball machine appear satisfying enough for field testing and training purposes (8). Players had to hit balls cross-court in a prescribed pattern (i.e., topspin drive), and the landing point for thrown balls was set 3 m in front of baseline (Fig. 1B). Slice strokes were not allowed because of their potential influence on ball positioning and therefore on TEST performance and associated physiological responses.

A standardized warm-up preceded TEST. It consisted of cycling an ergocycle (75–100 W) for 10 min. TEST started with a 2-min “habituation” phase where a BF of 16 shots per minute with balls thrown to the central area of the court (minimal lateral displacement) was adopted. After 1 min of passive rest (quiet standing), the main test procedure began: a BF of 10 shots per minute was first selected, which was then increased by two shots per minute every minute until the stage corresponding to a BF of 22 shots per minute. From there, increment in BF was set at more than one shot per

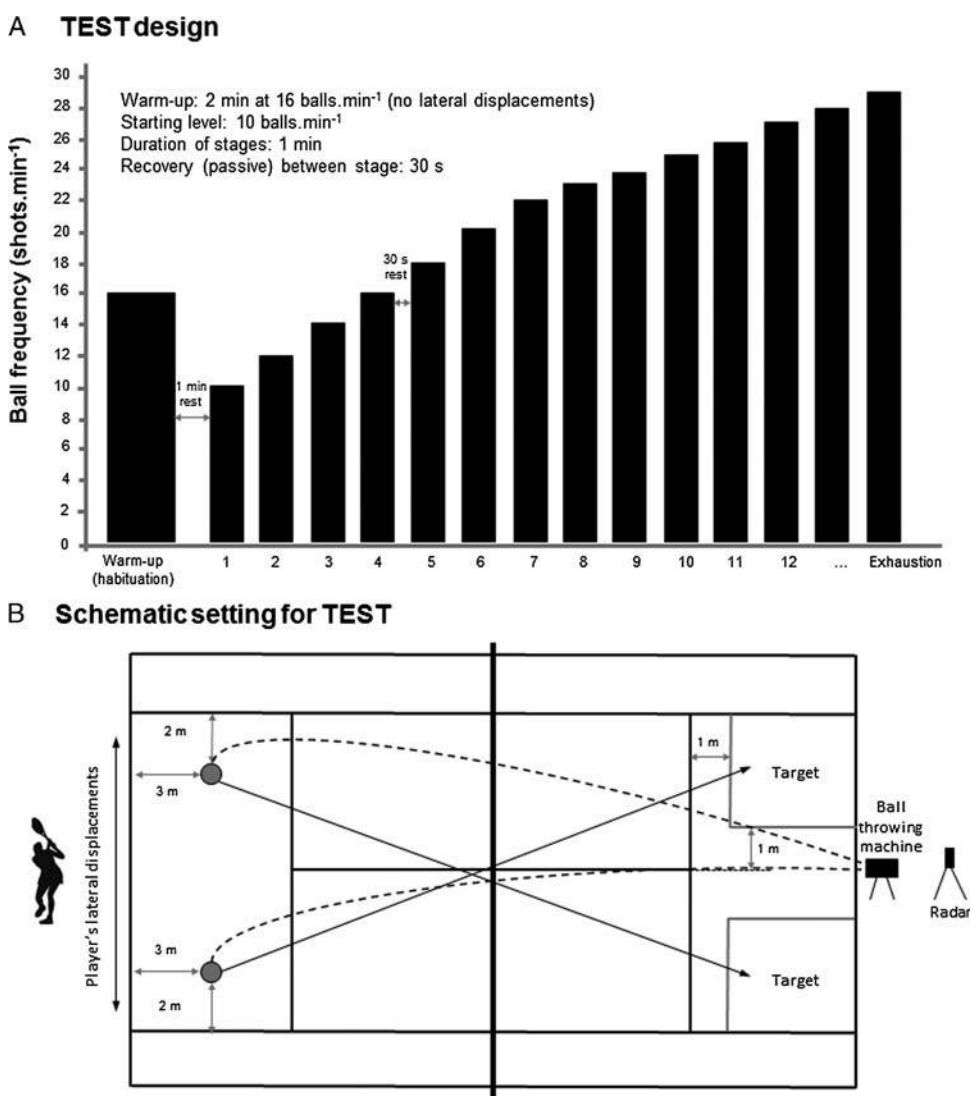


FIGURE 1—Design (A) and schematic setting (B) for the incremental TEST.

minute until exhaustion (Fig. 1A). After each 1-min stage, a 30-s passive recovery break (quiet standing) was implemented.

Players were asked to perform TEST as closely to what they would do during official competitions. They were told to “hit the ball with the best possible velocity/accuracy ratio.” Participants had visual of the areas in which they were aiming at. Stroke involvement was motivated by “live” (immediate) feedback. On the basis of previous results (13) reporting range of BV ball velocities between 86 and 120 km.h<sup>-1</sup> (submaximum to maximum strokes), BV G 80 km.h<sup>-1</sup> was chosen as the criteria for unsuccessful BV and BA (30% of balls landing outside the target zone) at the end of each stage completed. To ensure standardized playing conditions, a minimum of 100 balls (Roland Garros®) was used every six tests.

TEST ended with players' voluntary exhaustion or was stopped by the researchers if (i) the players felt exhausted or failed to reach and hit the ball twice in a row or (ii) the players were no longer able to perform strokes with an acceptable execution technique and a demise in BV/BA, as determined by two experienced coaches (i.e., national level coaches with >15 yr experience at elite level) through subjective observation. Specifically, participants were given a warning the first time they disrespect the rules, but they were stopped on the second warning. Performance was measured as the total test duration.

**Evaluation of ground stroke performance.** During TEST, ground stroke production was assessed by the mean of two “primary” variables: BV and BA. BV (km.h<sup>-1</sup>) was measured with a Solstice 2 radar (Hightof®, Domaine de l'Étançon, France) positioned 50 cm behind the baseline. All shots that were hit out, into the net, and to the wrong spot on the tennis court were excluded. Spots where each ball landed (i.e., hits–errors) were instantaneously recorded by an experienced coach on a dedicated recording sheet. BA (%) was defined as the percentage of correct hits in the defined zones (3). For each stage, BV and BA data have been averaged and expressed for forehands (BV<sub>f</sub> and BA<sub>f</sub>, respectively) and backhands (BV<sub>b</sub> and BA<sub>b</sub>, respectively), separately. Finally, because BV and BA in combination better reflect the overall stroke precision in tennis, a TP index was calculated for forehands and backhands separately (TP<sub>f</sub> and TP<sub>b</sub>) as the product of these two variables.

**Physiological measurements.** Expired air was analyzed continuously (breath-by-breath measurements) for oxygen consumption ( $\dot{V}O_2$ ) using a portable gas analyzer (Metamax II CPX system, Cortex®, Leipzig, Germany). Gas and volume calibration of the measurement device were performed before each test according to manufacturer's instructions. HR was recorded continuously (Suunto Ambit2®, Vantaa, Finland). Furthermore, 25 KL capillary blood samples were collected from fingertip and analyzed for blood lactate concentrations (LT-1710; Arkray®, Kyoto, Japan) at the baseline, during TEST (i.e., during the 30-s recovery periods after every stage until a values of 4 mmol.L<sup>-1</sup> was obtained and thereafter every 2 stages), and 15 s after exhaustion.

$\dot{V}O_{2max}$  was determined by the observation of a “plateau” or leveling off in  $\dot{V}O_2$  or when the increase in two successive periods was less than 150 mLmin<sup>-1</sup> (40). HR<sub>max</sub> was considered as the highest value reached during the final minute of the test. We only considered values from 60% to 100% of  $\dot{V}O_{2max}$ , with step of 5% to be as precise as possible to analyze the variations of data.

**Detection of the second ventilatory threshold (VT2).** Detection of VT2 was done by analyzing the points of change in slope (breaks in linearity) of ventilatory parameters (18,40). VT2 was determined using the criteria of an increase in  $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$  with no increase in  $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$  and departure from the linearity of  $\dot{V}_E$ . All VT2 assessments were made by visual inspection of graphs of time plotted against each relevant respiratory variable measured during testing. All visual inspections were conducted by two experienced exercise physiologists. The results were then compared and averaged. The difference in the individual determinations of VT2 was G3%.

## Statistical Analysis

Mean T SD was calculated for all variables. BV, BA, and TP data were compared using a two-way repeated-measures ANOVA (condition [forehands vs backhands] x exercise intensity [60%, 65%, . . . , 100% of  $\dot{V}O_{2max}$ ]). However, when the normality test failed, a Mann–Whitney rank sum test was performed at each time interval. The Bonferroni test was used for *post hoc* comparisons. Finally, Pearson rank-order correlations were used to test the association (for forehands and backhands separately) of TP with BV, BA, and blood lactate concentrations. Correlations of players ranking level with technical variables have also been checked. The following criteria were adopted to interpret the magnitude of *r*: trivial, < 0.1; small, 0.1–0.3; moderate, 0.3–0.5; large, 0.5–0.7; very large, 0.7–0.9; almost perfect, 0.9–1.0 (22). Statistical significance was accepted at *P* < 0.05. The statistical analyzes were performed using SigmaStat 3.5 software.

## RESULTS

**TEST performance and physiological performance.** TEST duration was 908 ± 94 s. At exhaustion,  $\dot{V}O_{2max}$ , HR<sub>max</sub>, and blood lactate concentration values were 61.4 ± 5 mL.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>, 195.8 ± 1.4 bpm, and 10.5 T 1.9 mmol.L<sup>-1</sup>, respectively (Fig. 2). At VT2,  $\dot{V}O_2$  and HR were 53.8 ± 4.5 mL.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup> (87.7% ± 0.01% of  $\dot{V}O_{2max}$ ) and 183.7 ± 4.2 bpm (93.8% ± 1.6% of HR<sub>max</sub>), respectively. The mean completed stages when players had reached VT2 were 7.3 T 2.8.

**Ground stroke performance.** BV, BA, and TP (both backhand and forehand) did not differ between 60% and 80% of  $\dot{V}O_{2max}$  (Fig. 3). We found significant reductions above this later intensity with decreased BV, BA, and TP. BV, BA, and TP decreased from 80% to 100% of  $\dot{V}O_{2max}$  (Table 1).

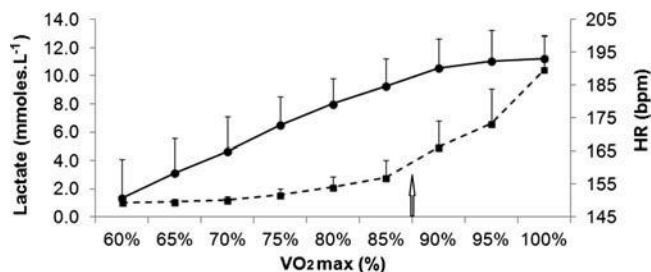


FIGURE 2—Changes in HR (plain line) and blood lactate concentration (dotted line) as a function of exercise intensity (% of  $\dot{V}O_{2max}$ ). Vertical arrow indicates the second ventilatory threshold.

BV ( $P = 0.042$ ) displayed a significant interaction effect between measurement time and testing condition, whereas there was no significant difference for BA ( $P = 0.930$ ) and TP ( $P = 0.536$ ) (Fig. 4).  $BV_f$  was 5.2% higher than  $BV_b$  ( $121.7 \pm 4.9$  vs  $115.7 \pm 8.6$  km.h<sup>-1</sup>).

Not surprisingly, there were correlations between the players' ranking level and BA in both forehand ( $r = -0.45$  to  $-0.47$ ,  $P < 0.05$ ) and backhands ( $r = -0.49$ ,  $P < 0.05$ ) and with TP ( $r = -0.44$  to  $-0.46$ ,  $P < 0.05$ ) for forehand only between 80% and 100% of  $\dot{V}O_{2max}$ .

**Correlation between variables.** Associations of TP with BV ( $r = 0.51$  and  $r = 0.49$ ; both  $P < 0.001$ ) and BA ( $r = 0.91$  and  $r = 0.96$ ; both  $P < 0.001$ ) for forehands and backhands were significant (Fig. 4).

From 60% to 100% of  $\dot{V}O_{2max}$ , changes in TP (i.e., forehands and backhands combined) and blood lactate concentration were inversely correlated ( $r = -0.51$ ,  $P = 0.008$ ) (Fig. 5).

## DISCUSSION

We investigated the effects of incremental fatigue on stroke production (BV, BA, and TP) changes, for forehands and backhands separately, and their relationships with physiological responses in elite players undergoing TEST. Our novel results are that (i) ground stroke production (BV, BA, and TP) was maintained constant until an intensity of 80%  $\dot{V}O_{2max}$  from which all technical indices decreased steadily until exhaustion, independently of the stroke; (ii) BV was higher for forehands versus backhands, whereas BA and TP did not differ between strokes; (iii) associations of TP with BA were stronger compared with BV for both forehands and backhands; (iv) changes in TP and blood lactate concentration were inversely correlated from 60% to 100% of  $\dot{V}O_{2max}$ . These results confirm only partly our initial hypothesis because performance was not modified with increasing intensities until 80% of  $\dot{V}O_{2max}$  (slightly before VT2), but similar progressive technical alterations between forehands and backhands occurred above this intensity until exhaustion.

**Technical responses.** In this study, highest BV values ( $\sim 120$ – $125$  km.h<sup>-1</sup>) were observed at 80% of  $\dot{V}O_{2max}$ , and BV decreased progressively from 80% to 100% of  $\dot{V}O_{2max}$  ( $-9.0\%$  and  $-13.3\%$  for forehands and backhands, respectively) (Fig. 3). On the basis of decrease in EMG amplitude

signals during maximal contractions of isolated muscles (knee extensors and plantar flexors), decrements in muscle activation have been reported during prolonged (3 h) tennis playing (19). Furthermore, fatigue induced by tennis practice can lead to significant modifications in upper limb muscle recruitment level and/or temporal pattern (33). Although these previous studies illustrated modulation of the muscle recruitment strategy, in the absence of functioning measures of CNS, this hypothesis cannot be accepted or rejected under the frame of our study (incremental fatigue). An alternative explanation to the speed–accuracy trade-off is proposed by Welsh et al. (41). On the basis of CNS control of motor units, these authors proposed that fatigue is associated with a decrement in central control. More recently, Rota et al. (33) hypothesized that both conscious and sub-conscious strategies, leading to a larger recruitment of muscle activity to nonfatigued muscles, would aim to protect the organism and/or limit deterioration in performance. Our results display a significant decrease in BA (f:  $59.1\% \pm 15.2\%$  vs  $46.5\% \pm 19.1\%$ ; b:  $63.1\% \pm 13.1\%$  vs  $50\% \pm 19.7\%$ ) between 80% and 100% of  $\dot{V}O_{2max}$  (Fig. 3). Rota et al. (33) observed also a decrease ( $\sim 12\%$ ) in forehand accuracy, with a consistency index decrement of 15.6% after a fatiguing intermittent tennis exercise. In their study, however, forehand velocity was well preserved. Previous studies have assessed the effect of fatigue on technical skills in tennis and highlighted that BA is paramount for tennis skill performance (10,25,39). Reportedly, BA explained 37% of variability in competitive performance ( $r = 0.61$ ,  $P = 0.001$ ) as well as 53% or 55% in combination with  $\dot{V}O_{2max}$  or VT2 values, respectively (3).

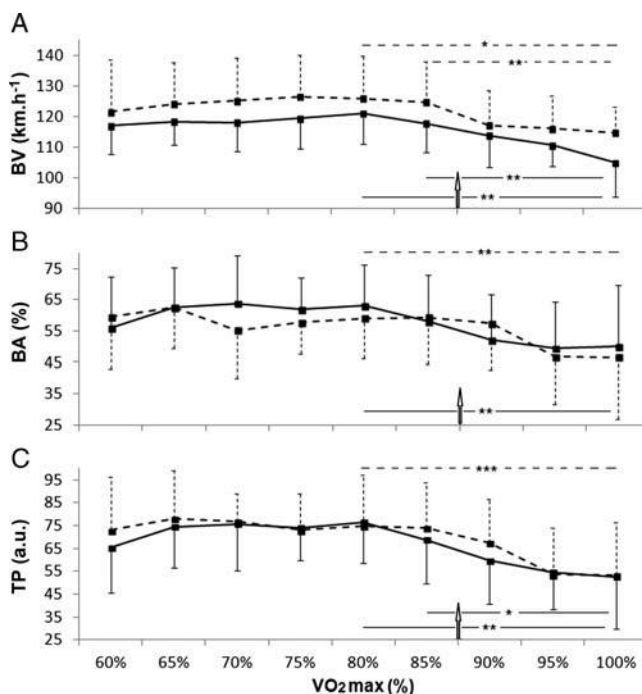


FIGURE 3—Changes in BV (A), BA (B), and TP (C) as a function of exercise intensity (% of  $\dot{V}O_{2max}$ ) for forehands (white dots) and backhands (black dots). Vertical arrow indicates the second ventilatory threshold.



TABLE 1. Differences in relative (%) and absolute values of BV (km.h<sup>-1</sup>), BA (expressed as percent in zone), and TP (calculated as BA x BV and expressed as arbitrary units) for both forehands and backhands between 80% and 100% of  $\dot{V}O_{2max}$ .

		Forehand	Pct. (ES)	Backhand	Pct. (ES)
BV	80%	126 ± 13.8	-9.0%* (ES = 0.98)	121 ± 9.9	-13.3%** (ES = 1.27)
	100%	114.7 ± 8.6		104.9 ± 14.9	
BA	80%	57.7 ± 10.4	-19.4%*** (ES = 0.79)	61.9 ± 10.1	-18.4%*** (ES = 0.73)
	100%	46.5 ± 17.1		50.5 ± 19.7	
TP	80%	73.0 ± 16.0	-27.4%*** (ES = 1.31)	74.1 ± 21.8	-29.1%*** (ES = 0.97)
	100%	53.0 T 14.4		52.5 T 22.6	

Values are presented as mean T SD. ES, effect size.

\* $P < 0.05$ , significantly different from 80% of  $\dot{V}O_{2max}$ .

\*\* $P < 0.01$ , significantly different from 80% of  $\dot{V}O_{2max}$ .

\*\*\* $P < 0.001$ , significantly different from 80% of  $\dot{V}O_{2max}$ .

Almost perfect correlations ( $r = 0.94$ ,  $P < 0.001$ ) have also been reported between stroke ratings (a surrogate of BA) and players' ranking (34). The difference in BA in our study compared with the study by Baiget et al. (3) ( $66\% \pm 9\%$  when both strokes are combined) could possibly be explained by the length of stage (2 vs 1 min). Another explanation could be that ball machine throwing velocity was slower than during TEST ( $68.6 \pm 1.9$  vs  $86.5 \pm 1.3$  km.h<sup>-1</sup>). In our study, the increase in the number of missed strokes could be related to poor timing or an inability of players to position themselves properly for stroke hitting (i.e., being "late"). In support, a decrement in maximal running speed likely occurs as players become fatigued, resulting in suboptimal stroke preparation (e.g., foot-work and balance) and ultimately in a slowing of BV (15).

It has been demonstrated that the CNS uses different neuromuscular adjustments; that is, compensatory strategies, to overcome fatigue effects to maintain the same movement performance (4). More precisely, during a hopping task, there are two strategies: one based on a preactivation of fatigued muscles to compensate for the stiffness decrease and

the other inducing a redistribution of muscle activity among muscles of different joints (4). In our study, players were able to maintain technical production until an intensity of 80%  $\dot{V}O_{2max}$ , which was slightly below VT2 (88% of  $\dot{V}O_{2max}$ ) (Fig. 5). Because of the accumulated fatigue from previous stages and increments in load, technical production decreased steadily thereafter until exhaustion. This pattern is quite similar as the one reported by Baiget et al. (3) where BA values reached on average 65%. In their study, however, technical error indices decreased earlier (stage 4 of 9), with accuracy values less than 40% at exhaustion. In our study, players maintained BA higher than 45% even near exhaustion (Fig. 3). This difference may be related to the level of tested players because highly skilled players (as tested here) are more likely to resist fatigue and implement such compensatory strategies. In support, Hornery et al. (23) showed no reductions in serve velocity and accuracy in professional players despite a technical degradation of service elements (i.e., height of the tossing arm at ball release, and position and height of the ball toss) as match progressed.

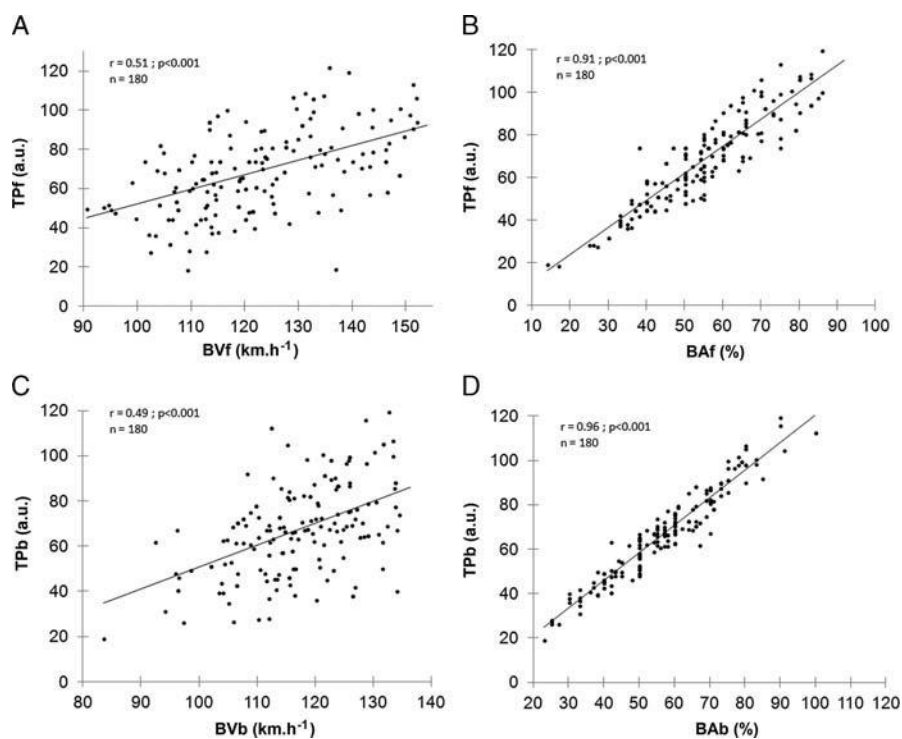
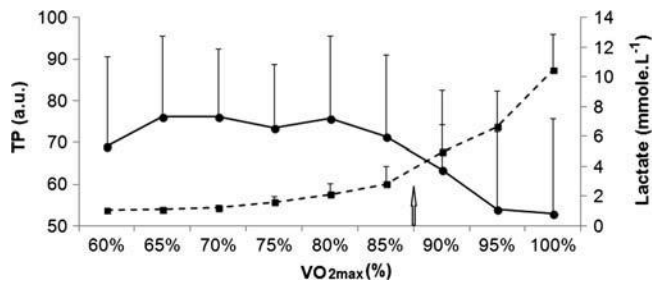


FIGURE 4—Associations of TP with BV (A, C) and BA (B, D) for forehands and backhands.



**FIGURE 5**—Changes in TP (plain line) and blood lactate concentration (dotted line) as a function of exercise intensity (% of  $\dot{V}O_{2max}$ ). Vertical arrow indicates the second ventilatory threshold.

**Relationships between physiological and technical responses.** Recent efforts have been made to develop field tests for tennis to determine the endurance capacity (15,18) or technical performance (i.e., stroke precision and accuracy) (35,38,39) of players with acceptable accuracy under standardized conditions. However, a limited number of studies have investigated these two aspects concurrently. The present study showed the usefulness of TEST in combining physiological measurements with ground stroke performance. Our results indicate that tennis players are able to control ball placement and ball speed during simulated tennis play to predetermined areas in the tennis court at increasing intensities up to 80% of  $\dot{V}O_{2max}$  (lactate concentration =  $2.1 \pm 0.7$  mmol.L<sup>-1</sup>, HR =  $175 \pm 1$  bpm, HR<sub>max</sub> =  $89\% \pm 4\%$ ). Interestingly, Lyons et al. (25) observed during the modified Loughborough Tennis Skills Test that the overall decline in accuracy from rest to high intensity (90% of HR<sub>max</sub>) was 40% in the expert players and 50% in the nonexpert players. The overall game intensity in tennis (60%–70% of  $\dot{V}O_{2max}$ , 70%–80% of HR<sub>max</sub> and 3–6 mmol.L<sup>-1</sup> of lactate) is moderate (14). Overall cardiac and ventilatory responses to match play are reported as relatively stable but may vary slightly depending on rally intensity, game style of tested players, and game situation (14). Our results show that functional tennis skills are impaired only higher than 80% of  $\dot{V}O_{2max}$ , therefore suggesting that impaired technical performance is likely to occur during isolated periods of higher intensity (succession of intense rallies), where VT2 intensity (88% of  $\dot{V}O_{2max}$  and 94% of HR<sub>max</sub> or higher) is reached.

Of interest is that the correlation between TP and BA ( $r = 0.91$  and  $r = 0.96$ , for forehand and backhand strokes, respectively) is stronger than that with BV ( $r = 0.51$  and  $r = 0.49$ ) (Fig. 4), highlighting the prominence of the technical skills in elite tennis. It means that high technical skills but not neither power nor speed are necessary to be classified as a “technically good” player. Baiget et al. (3) also identified a significant and moderate correlation ( $r = 0.61$ ,  $P = 0.001$ ) between the competitive level and the accuracy. This highlights that to reach the highest level, players need not only to hit fast strokes but also need to maintain accuracy as fatigue develops.

Mean blood lactate concentrations in competition often are low to moderate, e.g.,  $1.2 \pm 0.3$  (28) or  $3.8 \pm 2.0$  mmol.L<sup>-1</sup>

(27). However, one may question the relevance of these mean values. In a study where matchlike conditions were reproduced in professional tennis players, blood lactate values as high as 8.6 mmol.L<sup>-1</sup> have been reported (27). This suggests a substantial participation of glycolytic processes to meet the energy supply. An interesting observation of our study was the inverse correlation ( $r = -0.51$ ,  $P = 0.008$ ) between changes in TP (i.e., forehands and backhands combined) and blood lactate concentration from 60% to 100% of  $\dot{V}O_{2max}$  (Fig. 5). Dramatic performance reductions is commonly observed when participants neared or reached volitional exhaustion (blood lactate concentration = 9.6 mmol.L<sup>-1</sup>) (10). Urhausen et al. (37) also reported a link between moderately high lactate concentrations of 3–7 mmol.L<sup>-1</sup> during a ball machine hitting test and reduced hitting accuracy. The energy demand and displacement constraint limit also the ability of the player to be at the right place and time to hit the ball more proficiently (5). At high glycolytic rates, the concentration of muscle lactate increases to substantial levels, and the associated increase in hydrogen ion (H<sup>+</sup>) concentration has often been implicated as a cause of fatigue (34). Although early research focused on acidosis as the most likely cause of muscular fatigue, intracellular Pi accumulation cannot be ruled out as an alternative potential explanation (43). The principle mechanism by which Pi appears to interfere with muscle function is by inhibiting Ca<sup>2+</sup> release from the sarcoplasmic reticulum. This in turn is believed to decrease force production by disturbing actin–myosin cross-bridge interactions. However, experimental evidence from human muscle fibers clearly speaks against acidosis as a central factor underlying the impeded contractility in fatigued muscles (42). Whatever the exact mechanisms, we hypothesized that peripheral disturbances partly caused deterioration in BV and BA at high intensities. In support, Ferrauti et al. (16) demonstrated that running velocity and stroke production (accuracy and velocity) during intermittent tennis drills are largely affected by the duration of recovery time.

**Backhand–forehand differences.** BV values were approximately 5% higher for forehands ( $\sim 120$  km.h<sup>-1</sup>) than backhands ( $\sim 115$  km.h<sup>-1</sup>). Our range of values compare well with those published elsewhere for international level players, e.g.,  $120 \pm 2$  km.h<sup>-1</sup> without differentiating forehands and backhands (39);  $120.7 \pm 6.3$  km.h<sup>-1</sup> for a tennis protocol with 6 x 30 s of exercise interspersed with 30 s of rest;  $115.8 \pm 5.9$  km.h<sup>-1</sup>, with 60 s of work (31); and  $120.4 \pm 6.0$  versus  $111.5 \pm 7.0$  km.h<sup>-1</sup> for forehand and backhand strokes during an incremental tennis test (13). In the real world, a match analysis of a Grand Slam Final (Australian Open 2012) revealed that top players hit more than 1100 ground strokes at average velocities  $> 95$  km.h<sup>-1</sup> (Rafael Nadal: 97 km.h<sup>-1</sup>; Novak Djokovic: 107 km.h<sup>-1</sup>) (30). Although new technologies such as Hawkeye inform us about the interaction between performance and fatigue and, therefore, offer practical information about how to improve players' preparation in the future, they remain largely unreported (30).

**Practical applications.** Here we highlight two practical implications of our findings. First, using TEST data technically or physically oriented training sessions can easily be developed, for example, as we detailed for one elite player (7). We showed that TP is affected by the arduousness of the activity, which offers the coaches the possibility to carefully adjust intensity of the practice to target-specific development objectives within the same session.

When targeting improvement in technical skills, we would recommend to train in low intensities, zone 1 (low intensity:  $\dot{V}O_2$  at or below VT1) (11), aiming BA  $\sim 70\%$  and BV  $\sim 120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Even if it represents a small playing time ( $3\% \pm 5\%$ ) (2), it seems also interesting to improve the capacity to cope with the higher intensity of the competitive tennis (zone 3:  $\dot{V}O_2$  at or beyond VT2) because it corresponds to the “money time” of the game. This triphasic model can also be based on the HR response associated to reproducible metabolic demarcation points (i.e., lactate or ventilatory thresholds), thus allowing to examine the physiological strain during various types of exercise. It has consistently been used in continuous sports (11) and in team sports such as soccer (1). The HR-based model was previously used in tennis and defines three HR zones (2): zone 1 (low intensity,  $<70\% \text{ HR}_{\text{max}}$ ), zone 2 (moderate intensity,  $70\%–85\% \text{ HR}_{\text{max}}$ ), and zone 3 (high intensity,  $>85\% \text{ HR}_{\text{max}}$ ). Second, TEST enables to easily assess BA that is a key predictor for tennis competitions (35), which is also supported by significant correlations between stroke production and success in match play (32,39).

**Strengths and limitations—perspectives.** The reader needs to be cognizant that tests criteria (rhythm, direction, and velocity of the ball feeding) and player movement characteristics (strokes and running details) are difficult to standardize across the range of tests available. When evaluating fatigue-related changes in tennis skill performance, different protocols, targets (size and court areas), and accuracy scoring systems or players with different skill levels have been used across studies. Altogether, this prevents meaningful comparisons and definitive conclusions to be drawn about the effect of fatigue on tennis skill performance. Although all efforts have been made to make TEST as specific as possible to the game of tennis, it is also acknowledged that simulated tennis practice does not completely reflect the actual competition situation (lack of visual cues, lower uncertainties, and anticipation). To date, no study in professional tennis singles has specifically documented energy expenditure during crucial points such as congested intense rallies, the end of a set, or tie break. Hence, only external markers (e.g., distance covered, number of strokes, ball placement, and player on-court positioning) have been investigated to reflect strenuous match intensities (30). Thus, it is difficult to ascertain that the alteration in accuracy reported in the present study (incremental test) when energy demand overpasses  $80\% \text{ of } \dot{V}O_{2\text{max}}$  will also be manifested during an actual tennis match when a similar range of intensities is reached.

It is possible that with ensuing physiological fatigue, the mentally strong player may alter their stroke intention to

avoid errors rather than attempting to hit winners. An interdisciplinary approach exploring cognitive skills and/or personality variables (i.e., attentional focus, arousal control, and impulsivity) in addition to physiological and biomechanical aspects may allow for a more comprehensive analysis of tennis skill performance and a deeper understanding of fatigue effects on performance in tennis (decision-making process), notably during crucial moments of a game (i.e., decisive points and final stages of match play). Furthermore, the study of subjective correlates of fatigability during exercise has been limited to perceived exertion, which is not the same construct as perceived fatigue. Evaluation of breathing difficulty, limb discomfort, and overall peripheral discomfort is needed during TEST, notably in relation to velocity/accuracy measurements to better understand why TP decreased.

The “consistency” of the players’ shots to both the right and left courts required that the ball land anywhere in the area (outlined in Fig. 1). Consequently, BA was derived from the number of balls that hit the target for each respective side. In addition to BV and BA, a key determinant to overall shot production also includes precision of lateral and longitudinal ball placement (38,39). As such, there is a need to measure more precisely single shot placement (distance to sideline/baseline) and recognition of where those missed shots were performed (net, wide, and long errors).

Ventilation and locomotion coupling has been observed and described during incremental exercise protocols. The locomotion–respiration coupling (LRC) has been identified to be subordinate to consistent locomotive patterns under competitive conditions, in some cyclic sports such as cycling, running, wheelchair propulsion, and rowing (9). We can hypothesize that LRC is disturbed around and above VT2, and we can speculate that TP is altered by the ventilatory modifications combined with the increase in BF. It remains to verify whether LRC changes at least partially explain the decrease in technical indices seen from  $80\% \text{ of } \dot{V}O_{2\text{max}}$ .

The fatigue-related reductions in skeletal muscle power output are caused by altered efferent command from the brain (29). Previous article on TEST indicated high RPE ( $17.1 \pm 1.4$ ) at the end of the exercise (6), and correlation has been demonstrated between RPE and electroencephalogram (29). Subjectively perceived exertion is highly associated with increases in core temperature and frequency changes of the electroencephalogram obtained over the prefrontal cortex. Therefore, one cannot rule out an indirect effect of elevation of core temperature (i.e., hyperthermia) during the TEST.

Although corresponding to a high metabolic demand, the intensity ( $80\% \text{ of } \dot{V}O_{2\text{max}}$ ) associated with a sharp decrease in TP during TEST may not be specially associated with any specific level of force or power decrease. One cannot rule out that displacements with increasing speeds and degree of mechanical stress when changing directions also had an important effect. Even if increasing fatigue may result from perturbations in activation of upper and lower limb muscles, this has not been evidenced in the present study and requires further studies.

## CONCLUSION

TEST offers the possibility to concurrently evaluate changes in ground stroke production in conjuncture with physiological parameters with incremental fatigue in a tennis-specific context. In elite players, technical alterations (i.e., decrease in BV, accuracy, and technical performance) occurred only at high intensity (>80% of  $\dot{V}O_{2\max}$ ) and were of similar magnitudes for forehand and backhand strokes. Proposed mechanisms for explaining the long maintenance in technical performance include compensatory strategies to overcome fatigue and neuromuscular adaptation to protect organism and/or limit performance losses. The decreased performance at high intensities

might come from indirect deleterious effects on motor or cerebral functions of acidosis, hyperventilation, hyperthermia, or neuromuscular fatigue (central activation failure and alterations in excitation–contraction coupling). Most of these mechanisms remain to be further investigated in a specific setup.

The authors have no conflicts of interest, source of funding, or financial ties to disclose and no current or past relationship with companies or manufacturers who could benefit from the results of the present study.

The results of the study are presented clearly, honestly, and without fabrication, falsification, or inappropriate data manipulation and do not constitute endorsement by the American College of Sports Medicine.

## REFERENCES

1. Akubat I, Patel E, Barrett S, Abt G. Methods of monitoring the training and match load and their relationship to changes in fitness in professional youth soccer players. *J Sports Sci*. 2012;30(14): 1473–80.
2. Baiget E, Fernández-Fernández J, Iglesias X, Rodríguez FA. Tennis play intensity distribution and relation with aerobic fitness in competitive players. *PLoS One*. 2015;10(6):e0131304.
3. Baiget E, Fernández-Fernández J, Iglesias X, Vallejo L, Rodríguez FA. On-court endurance and performance testing in competitive male tennis players. *J Strength Cond Res*. 2014;28(1):256–64.
4. Bonnard M, Sirin AV, Oddsson L, Thorstenson A. Different strategies to compensate for the effects of fatigue revealed by neuromuscular adaptation processes in humans. *Neurosci Lett*. 1994;166(1):101–5.
5. Botton F, Hautier C, Eclache JP. Energy expenditure during tennis play: a preliminary video analysis and metabolic model approach. *J Strength Cond Res*. 2011;25(11):3022–8.
6. Brechbuhl C, Girard O, Millet GP, Schmitt L. On the use of a test to exhaustion specific to tennis (TEST) with ball hitting by elite players. *PLoS One*. 2016;11(4):e0152389.
7. Brechbuhl C, Girard O, Millet GP, Schmitt L. Stress test specific to tennis (TEST): case study of an elite player. *ITF Coach Sport Sci Rev*. 2016;70:26–9.
8. Brechbuhl C, Millet G, Schmitt L. Accuracy and reliability of a new tennis ball machine. *J Sports Sci Med*. 2016;15:263–7.
9. Daffertshofer A, Huys R, Beek PJ. Dynamical coupling between locomotion and respiration. *Biol Cybern*. 2004;90(3): 157–64.
10. Davey PR, Thorpe RD, Williams C. Fatigue decreases skilled tennis performance. *J Sports Sci*. 2002;20(4):311–8.
11. Esteve-Lanao J, San Juan AF, Earnest CP, Foster C, Lucia A. How do endurance runners actually train? Relationship with competition performance. *Med Sci Sports Exerc*. 2005;37(3):496–504.
12. Fargeas-Gluck MA, Léger LA. Comparison of two aerobic field tests in young tennis players. *J Strength Cond Res*. 2012;26(11): 3036–42.
13. Fernandez-Fernandez J, Kinner V, Ferrauti A. The physiological demands of hitting and running in tennis on different surfaces. *J Strength Cond Res*. 2010;24(12):3255–64.
14. Fernandez J, Mendez-Villanueva A, Pluim BM. Intensity of tennis match play. *Br J Sports Med*. 2006;40(5):387–91; discussion 91.
15. Ferrauti A, Kinner V, Fernandez-Fernandez J. The Hit & Turn Tennis Test: an acoustically controlled endurance test for tennis players. *J Sports Sci*. 2011;29(5):485–94.
16. Ferrauti A, Pluim BM, Weber K. The effect of recovery duration
17. Fitts PM. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *J Exp Psychol*. 1954;47(6):381–91.
18. Girard O, Chevalier R, Leveque F, Micallef JP, Millet GP. Specific incremental field test for aerobic fitness in tennis. *Br J Sports Med*. 2006;40(9):791–6.
19. Girard O, Lattier G, Maffiuletti NA, Micallef JP, Millet GP. Neuromuscular fatigue during a prolonged intermittent exercise: application to tennis. *J Electromyogr Kinesiol*. 2008;18(6):1038–46.
20. Girard O, Racinais S, Micallef JP, Millet GP. Spinal modulations accompany peripheral fatigue during prolonged tennis playing. *Scand J Med Sci Sports*. 2011;21(3):455–64.
21. Harriss DJ, Atkinson G. Ethical standards in sport and exercise science research: 2014 update. *Int J Sports Med*. 2013;34(12):1025–8.
22. Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, Hanin J. Progressive statistics in sports medicine and exercise science. *Med Sci Sports Exerc*. 2009;41(1):3–13.
23. Hornery DJ, Farrow D, Mujika I, Young W. Fatigue in tennis: mechanisms of fatigue and effect on performance. *Sports Med*. 2007;37(3):199–212.
24. Kovacs MS. Tennis physiology: training the competitive athlete. *Sports Med*. 2007;37(3):189–98.
25. Lyons M, Al-Nakeeb Y, Hankey J, Nevill A. The effect of moderate and high-intensity fatigue on groundstroke accuracy in expert and non-expert tennis players. *J Sports Sci Med*. 2013;12(2):298–308.
26. Maquiritain J, Baglione R, Cardey M. Male professional tennis players maintain constant serve speed and accuracy over long matches on grass courts. *Eur J Sport Sci*. 2016;16(7):845–9.
27. Mendez-Villanueva A, Fernandez-Fernandez J, Bishop D, Fernandez-Garcia B, Terrados N. Activity patterns, blood lactate concentrations and ratings of perceived exertion during a professional singles tennis tournament. *Br J Sports Med*. 2007;41(5):296–300; discussion 300.
28. Murias JM, Lanatta D, Arcuri CR, Laiño FA. Metabolic and functional responses playing tennis on different surfaces. *J Strength Cond Res*. 2007;21(1):112–7.
29. Nybo L, Nielsen B. Perceived exertion is associated with an altered brain activity during exercise with progressive hyperthermia. *J Appl Physiol (1985)*. 2001;91(5):2017–23.
30. Reid M, Duffield R. The development of fatigue during match-play tennis. *Br J Sports Med*. 2014;48(1 Suppl):i7–11.
31. Reid M, Duffield R, Dawson B, Baker J, Crespo M. Quantification of the physiological and performance characteristics of on-court tennis drills. *Br J Sports Med*. 2008;42(2):146–51; discussion 51.
32. Roetert E, Garret GE, Brown SW, Camaione DN. Development of a performance profile to assess national ranked junior tennis players. *Med Sci Sports Exerc*. 1991;20(S 42).

33. Rota S, Morel B, Saboul D, Rogowski I, Hautier C. Influence of fatigue on upper limb muscle activity and performance in tennis. *J Electromyogr Kinesiol.* 2014;24(1):90–7.
34. Sahlin K. Metabolic factors in fatigue. *Sports Med.* 1992;13(2):99–107.
35. Smekal G, Pokan R, von Duvillard SP, Baron R, Tschan H, Bachl N. Comparison of laboratory and “on-court” endurance testing in tennis. *Int J Sports Med.* 2000;21(4):242–9.
36. Triolet C, Benguigui N, Le Runigo C, Williams AM. Quantifying the nature of anticipation in professional tennis. *J Sports Sci.* 2013; 31(8):820–30.
37. Urhausen A, Kullmer T, Schillo C, Kinderman W. Performance diagnostics in tennis. *Dtsch Z Sportmed.* 1988;39:340–6.
38. Vergauwen L, Madou B, Behets D. Authentic evaluation of forehand groundstrokes in young low- to intermediate-level tennis players. *Med Sci Sports Exerc.* 2004;36(12):2099–106.
39. Vergauwen L, Spaepen AJ, Lefevre J, Hespel P. Evaluation of stroke performance in tennis. *Med Sci Sports Exerc.* 1998;30(8): 1281–8.
40. Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer WW, Whipp BJ. *Principles of Exercise Testing and Interpretation: Including Pathophysiology and Clinical Applications.* 4th ed. Philadelphia (PA): Lippincott Williams & Wilkins; 2005. pp. 1–585.
41. Welsh RS, Davis JM, Burke JR, Williams HG. Carbohydrates and physical/mental performance during intermittent exercise to fatigue. *Med Sci Sports Exerc.* 2002;34(4):723–31.
42. Westerblad H. Acidosis is not a significant cause of skeletal muscle fatigue. *Med Sci Sports Exerc.* 2016;48(11):2339–42.
43. Westerblad H, Allen DG, Lännergren J. Muscle fatigue: lactic acid or inorganic phosphate the major cause? *News Physiol Sci.* 2002;17:17–21.

## ***Chapitre 11***

***Article 6 – Vers un entraînement polarisé en tennis? Intérêt  
d'une approche combinant évaluations techniques et  
physiologiques lors d'un nouveau test incrémental sur le  
terrain***

**Article 6- Towards polarized training in tennis? Usefulness of combining technical and physiological assessments during a new incremental field test.**

Brechbuhl C., Girard O., Millet G. P., Schmitt L. (2017). *ITF Coaching & Sport Science Review* (73):18-21.

# Towards polarized training in tennis? Usefulness of combining technical and physiological assessments during a new incremental field test

[Cyril Brechbuhl](#), [Olivier Girard](#), [Grégoire Millet](#) and [Laurent Schmitt \(FRA\)](#)

ITF Coaching and Sport Science Review 2017; 73 (25): 18-21 ABSTRACT

*Although tennis performance analysis underlines the relationship between physical and technical parameters, scientific or coaching approaches often neglect to develop these two aspects in the same training session. The effectiveness of combining physical and technical factors is reinforced by new results made available through the optimization of new technologies. Here, we discuss how the use of radar and ball machine may offer practical information to improve players' preparation concerning production of optimal ball velocity, ball accuracy and ball frequency.*

**Keywords:** Incremental test, ball accuracy, ball velocity, polarized training

**Corresponding author:** [cyril.brechbuhl@fft.fr](mailto:cyril.brechbuhl@fft.fr)

Article received: 28 Sep 2017

Article accepted: 15 Nov 2017

## INTRODUCTION

For the past 30 years, tennis has evolved from a sport in which players' skill proficiency (technique) was the main determinant of performance into a game where physical attributes likely play a more predominant role. Nowadays, tennis is characterized by intense physical demands (Kovacs, 2007; Mendez-Villanueva, Fernandez-Fernandez, Bishop, Fernandez-Garcia, & Terrados, 2007) coupled with rapid perceptual-motor processing (Triolet et al., 2013). Tennis is an explosive sport based on power, strength, and speed, in which serves faster than 200 km.h<sup>-1</sup> are common (Kovacs, 2007).

In addition to producing elevated ball velocity (BV, km.h<sup>-1</sup>), maintaining ball accuracy (BA, i.e., number of errors, %) during intense periods towards a set or match end is also a key component for winning the faster-paced modern game (Kovacs, 2007). Although the sport-specific technical skills and tactical choices are predominant factors, even in the modern game, players require well-developed physical conditioning in order to execute advanced shots and maintain stroke efficiency as fatigue develops (Girard, Lattier, Maffiuletti, Micallef, & Millet, 2008).

Evaluation of aerobic fitness is commonly used to characterize training effects, evaluate physical fitness, and identify target training areas (Brechbuhl et al., 2016a). Recently, Baiget et al. highlighted the usefulness of using the Maximal Aerobic Frequency of ball hitting as a new training load parameter in tennis (Baiget et al., 2017), while we introduced analysis of technical alterations with incremental fatigue during a Test to Exhaustion Specific to Tennis (TEST) (Brechbuhl et al., 2017). Considering these two recent articles, we aim to report how they can lead to the integration of combined technical and physical prescription for specific on-court training. Moreover it is possible to assess the implementation of the "polarized training" approach (Seiler & Kjerland, 2006) in tennis by classifying types of sessions. Seiler and Kjerland (2006) refer to this training distribution as a polarized model, where approximately 75% of sessions are performed below the first ventilatory threshold, with 15% above the second ventilatory threshold and < 10% performed between the first and second ventilatory thresholds.

## EQUIPMENT AND METHOD

### Players

Twenty high-level competitive male tennis players (mean ± SD; age = 18.0 ± 3.2 year, stature = 182.8 ± 7.3 cm, body mass = 72.7 ± 7.2 kg) volunteered to participate in the study. They were all members of the national teams of the French Tennis Federation (International Tennis



Number 1 [elite]). Players were either members of the Association of Tennis Professionals (ATP) (two in top 100, two in top 200, two in top 500, and nine in top 1000) or of the International Tennis Federation (ITF) Juniors ranking (Participating in Grand Slams) at the time of the experiments (2013–2015). Two players have now reached the top 30 ATP.

All players performed the TEST protocol, previously described (Brechbuhl et al., 2016a; Brechbuhl et al., 2016b; Brechbuhl et al., 2017). Both the accuracy and the reliability of this new tennis ball machine appear satisfying enough for field testing and training purposes (Brechbuhl et al. 2016).

### Evaluation of ground stroke performance

During TEST, groundstroke production was assessed by the mean of two "primary" variables: BV and BA. BV (km.h<sup>-1</sup>) was measured with a Solstice 2 radar (Hightof®, Echouboulains, France) positioned 50 cm behind the baseline. All shots that were hit out, into the net, and to the wrong spot on the tennis court were excluded. Spots where each ball landed (i.e., hits–errors) were instantaneously recorded by an experienced coach on a dedicated recording sheet. BA (%) was defined as the percentage of correct hits in the defined zones (Baiget et al., 2014). For each stage, BV and BA data have been averaged and expressed for forehands (BVf and BAf) and backhands (BVb and BA b), respectively. Finally, because BV and BA in combination better reflect the overall tennis performance, a TP index was calculated for forehands and backhands separately (TPf and TPb) as the product of these two variables.



## Physiological measurements

Expired air was analyzed continuously (breath-by-breath measurements) for oxygen consumption ( $\text{VO}_2$ ) using a portable gas analyzer (Metamax II CPX system, Cortex®, Leipzig, Germany). Gas and volume calibration of the measurement device were performed before each test according to manufacturer's instructions. HR was recorded continuously (Suunto Ambit2®, Vantaa, Finland). Furthermore, 25  $\mu\text{L}$  KL capillary blood samples were collected from the fingertip and analyzed for blood lactate concentrations (LT-1710; Arkray®, Kyoto, Japan) at the baseline, during TEST (i.e., during the 30-s recovery periods after every stage until a value of 4  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  was obtained and thereafter every 2 stages), and 15 s after exhaustion.

## RESULTS

The players reached on average stage  $10.9 \pm 1.5$  ( $\sim 26 \pm 1$  balls. $\text{min}^{-1}$ ). At exhaustion, maximal oxygen uptake ( $\text{VO}_{2\text{max}}$ ), maximal heart rate ( $\text{HR}_{\text{max}}$ ), and blood lactate concentration values were  $61 \pm 5$   $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $195.8 \pm 1.4$  bpm, and  $10.5 \pm 1.9$   $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectively. At the second ventilatory threshold (VT2),  $\text{VO}_2$  and HR were  $53.8 \pm 4.5$   $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  ( $87.7 \pm 0.1\%$   $\text{VO}_{2\text{max}}$ ) and  $183.7 \pm 4.2$  bpm ( $93.8 \pm 1.6\%$   $\text{HR}_{\text{max}}$ ), respectively, corresponding to stage  $7.3 \pm 2.8$  ( $\sim 22 \pm 3$  balls. $\text{min}^{-1}$ ).

## Ground stroke performance

BV, BA, and TP (both backhand and forehand) did not differ between 60% and 80% of  $\text{VO}_{2\text{max}}$  (Fig. 1).

We found significant reductions above this later intensity with BV, BA, and TP decreasing from 80% to 100% of  $\text{VO}_{2\text{max}}$  (Table 1) for both strokes.

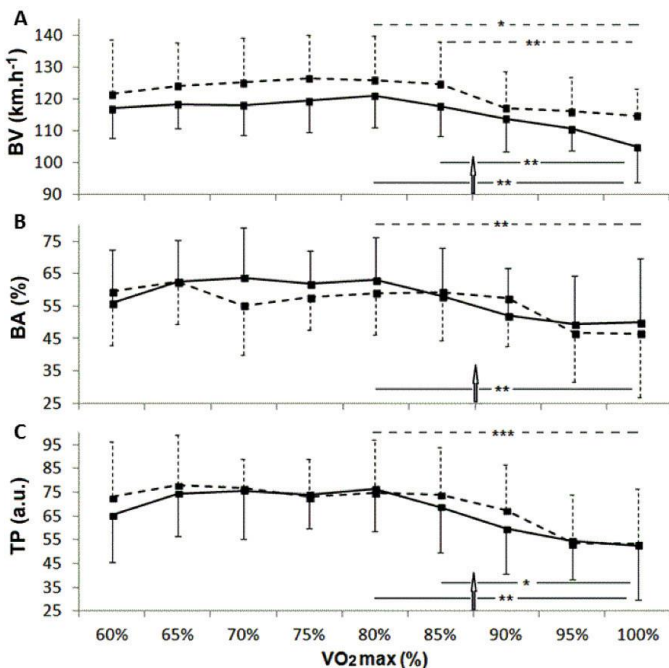


Figure 1: Changes in (A) ball velocity (BV), (B) ball accuracy (BA) and (C) tennis performance (TP) as a function of exercise intensity (% of  $\text{VO}_{2\text{max}}$ ) for forehands (white dots) and backhands (black dots). Vertical arrows indicate the second ventilatory threshold. BVf was 5.2% higher than BVb ( $121.7 \pm 4.9$  vs  $115.7 \pm 8.6$   $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ).

		Forehand	% change	Backhand	% change
BV	80%	126 $\pm$ 13.8	-9.0% *	121 $\pm$ 9.9	-13.3% **
	100%	114.7 $\pm$ 8.6		104.9 $\pm$ 14.9	
BA	80%	57.7 $\pm$ 10.4	-19.4%***	61.9 $\pm$ 10.1	-18.4%***
	100%	46.5 $\pm$ 17.1		50.5 $\pm$ 19.7	
TP	80%	73.0 $\pm$ 16.0	-27.4%***	74.1 $\pm$ 21.8	-29.1%***
	100%	53.0 $\pm$ 14.4		52.5 $\pm$ 22.6	

Table 1: Differences in relative (%) and absolute values of Ball Velocity (BV, in  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ), Ball Accuracy (BA, expressed as % in zone) and Tennis Performance (TP, calculated as  $\text{BA}\times\text{BV}$  and expressed as arbitrary units) for both forehands and backhands between 80% and 100% of  $\text{VO}_{2\text{max}}$ . Values are presented as mean  $\pm$  SD. \*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , \*\*\*  $P < 0.001$  significantly different from 80% of  $\text{VO}_{2\text{max}}$ .

## Correlation

Not surprisingly, there were correlations between the players' ranking level and BA in both forehand ( $r = 0.45$  to  $-0.47$ ,  $P < 0.05$ ) and backhands ( $r = -0.49$ ,  $P < 0.05$ ) and with TP ( $r = -0.44$  to  $-0.46$ ,  $P < 0.05$ ) for forehand only between 80% and 100% of  $\text{VO}_{2\text{max}}$ .

Associations of TP with BV ( $r = 0.51$  and  $r = 0.49$ ; both  $P < 0.001$ ) and BA ( $r = 0.91$  and  $r = 0.96$ ; both  $P < 0.001$ ) for forehands and backhands were significant. We observed an inverse correlation ( $r = -0.51$ ;  $P = 0.008$ ) between blood lactate concentration and TP.

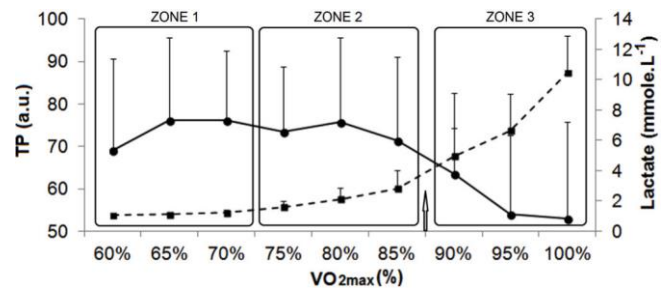


Figure 2: Intensity zones of change in tennis performance (TP) (plain line) and blood lactate concentration (dotted line) as a function of exercise intensity (% of  $\text{VO}_{2\text{max}}$ ). Zone 1 below 70% of  $\text{VO}_{2\text{max}}$ , zone 2 between 75% to 87% of  $\text{VO}_{2\text{max}}$  and zone 3 above 87% of  $\text{VO}_{2\text{max}}$ . Vertical arrows indicate the second ventilatory threshold.

## DISCUSSION

Elite players were able to maintain technical effectiveness until an intensity of 80%  $\text{VO}_{2\text{max}}$ , which was slightly below VT2 (87%  $\text{VO}_{2\text{max}}$ , and 94%  $\text{HR}_{\text{max}}$ ). Information obtained during TEST can be used to illustrate changes in stroke quality of tested players at different exercise intensities in a context appropriate to the game.

We highlight some practical implications of our findings. First, by using TEST data we propose that technically- or physically-oriented training sessions can easily be developed, as previously detailed for one elite player (Brechtbuhl et al., 2016b). Second, of interest is that the correlation between TP and BA ( $r = 0.91$  and  $r = 0.96$ , for forehand and backhand strokes, respectively) is stronger than that with BV ( $r = 0.51$  and  $r = 0.49$ ), highlighting the prominence of the technical skills in elite tennis. It means that high technical skills but not neither power nor speed are necessary to be classified as a "technically good" player. Baiget et al. (2014) also identified a significant and moderate correlation ( $r = 0.61$ ,  $P = 0.001$ ) between the competitive level and the accuracy. This

highlights that to reach the highest level, players need not only to hit fast strokes but also need to maintain accuracy as fatigue develops. BA has been identified as a key predictor for tennis competitions (Smekal et al., 2000). We showed that TP is affected by the arduousness of the activity (Brechtbuhl et al., 2017), so that coaches can carefully adjust training intensity in order to target specific development objectives within the same session (table 2).

For instance, when targeting improvement in technical skills, we recommend to train at low intensities, in zone 1 (VO<sub>2</sub> at or below VT1) (Esteve-Lanao et al., 2005), corresponding to BA of ~70% and BV of ~120 km.h<sup>-1</sup> in our cohort of players. Even if it represents a small playing time (3% ± 5%) (Baiget et al., 2015), time in zone 1 brings physiological benefits and will indirectly lead to improved capacity to cope with the higher intensity of competitive tennis (zone 3: VO<sub>2</sub> at or above VT2) corresponding to the “money time” of the game.

	Zone 1	Zone 2	Zone 3
	Stage 16-22 balls.min <sup>-1</sup> ≤ 70% VO <sub>2max.</sub> BA ~70% BV ~ 120 km.h <sup>-1</sup> < 80% HRmax. [la-] < 2 mmol.L <sup>-1</sup>	Stage 22-24 balls.min <sup>-1</sup> Between 75%-87% VO <sub>2max.</sub> BA < 60% ; BV < 120 km.h <sup>-1</sup> 80%-90% HRmax. 2 mmol.L-1 < [la-] < 4 mmol.L-1	Stage 25-29 balls.min <sup>-1</sup> VO <sub>2</sub> ≥ 87% VO <sub>2max.</sub> BA < 60% BV < 120 km.h <sup>-1</sup> > 90%HRmax [la-] > 4 mmol.L <sup>-1</sup>
<b>Technical</b>	Balance, energy transfer, skill of the hand, short footwork	bvgBig footwork, balance, energy transfer, coordination between upper and lower body	Velocity of footwork, balance, coordination between upper and lower body, braking and restarting of the course
<b>Physical</b>	Vascularisation of muscles, number and size of mitochondria, amount of aerobic enzymes and beta-oxidation enzymes (Laursen, 2010)	Use of shuttle systems of transport of hydrogen ions (Nicotinamide Adenine dinucleotide) (White & Schenk, 2012), carbohydrate and fat use (Holloszy, Kohrt, & Hansen, 1998))	Maximal Aerobic Frequency of ball hitting, cardiopulmonary capacity, transport of oxygen, glycolytic enzymes (Phosphofructokinase and Lactate deshydrogenase), muscle buffering capacity, muscle glycogen stores (Laursen & Jenkins, 2002)

Table 2. Sample for specific on-court training protocols for optimizing aerobic fitness and technical effectiveness in elite tennis players. Maximal oxygen uptake (VO<sub>2max.</sub>), ball accuracy (BA), ball velocity (BV), maximal heart rate (HRmax),

As shown in Figure 1, we can also estimate VT2 from the decline of the technical parameters, and more particularly the decrease in BA. Our proposed model with 3 intensity zones for training the tennis player can also be based on the HR response associated to reproducible metabolic demarcation points (i.e., lactate or ventilatory thresholds), thus allowing to examine the physiological strain during various types of exercise. It has consistently been used in endurance (Esteve-Lanao et al., 2005) and team sports (Akubat et al., 2012). The HR-based model was previously used in tennis and defines three HR zones (Baiget et al., 2015), while we suggest here the following distribution: zone 1

(low intensity, ≤ 80% HRmax), zone 2 (moderate intensity, 80% to 90% HRmax), and zone 3 (high intensity, ≥ 90% HRmax). Second, TEST enables us to easily assess BA, which is a key predictor of tennis performance (Smekal et al., 2000), also supported by significant correlations between stroke production and success in match play (Vergauwen et al., 1998).

## CONCLUSION

A model (3 intensities) is proposed starting from the realization of an incremental test in which physiological and technical data are measured simultaneously, and then their kinetics of change are compared.

Through TEST and its applications, our aim was to suggest a global approach designed to avoid redundant physiological demands.

Without underestimating the diversity of practices, the combination of physical and technical contents may contribute to more efficient planning and better management of fatigue. Since the present data only concerns elite male players, further investigation on female players is required.

## REFERENCES

Akubat, I., Patel, E., Barrett, S., & Abt, G. (2012). Methods of monitoring the training and match load and their relationship to changes in fitness in professional youth soccer players. *J Sports Sci*, 30(14), 1473-1480. doi:10.1080/02640414.2012.712711

Baiget, E., Fernandez-Fernandez, J., Iglesias, X., & Rodriguez, F. A. (2015). Tennis Play Intensity Distribution and Relation with Aerobic Fitness in Competitive Players. *PLoS One*, 10(6), e0131304. doi:10.1371/journal.pone.0131304

Baiget, E., Fernandez-Fernandez, J., Iglesias, X., Vallejo, L., & Rodriguez, F. A. (2014). On-court endurance and performance testing in competitive male tennis players. *J Strength Cond Res*, 28(1), 256-264. doi:10.1519/JSC.0b013e3182955dad

Baiget, E., Iglesias, X., & Rodriguez, F. A. (2017). Maximal Aerobic Frequency of Ball Hitting: A New Training Load Parameter in Tennis. *J Strength Cond Res*, 31(1), 106-114. doi:10.1519/JSC.0000000000001480

Brechtbuhl, C., Girard, O., Millet, G. P., & Schmitt, L. (2016a). On the Use of a Test to Exhaustion Specific to Tennis (TEST) with Ball Hitting by Elite Players. *PLoS One*, 11(4), e0152389. doi:10.1371/journal.pone.0152389

Brechtbuhl, C., Girard, O., Millet, G. P., & Schmitt, L. (2016b). Stress test specific to tennis. *ITF Coach Sport Sci Rev*(70), 26-29.

Brechtbuhl, C., Girard, O., Millet, G. P., & Schmitt, L. (2017). Technical Alterations during an Incremental Field Test in Elite Male Tennis Players. *Med Sci Sports Exerc*, 49(9), 1917-1926. doi:10.1249/MSS.0000000000001303

Brechtbuhl, C., Millet, G., & Schmitt, L. (2016). Accuracy and Reliability of a New Tennis Ball Machine. *J Sports Sci Med*, 15(2), 263



- Esteve-Lanao, J., San Juan, A. F., Earnest, C. P., Foster, C., & Lucia, A. (2005). How do endurance runners actually train? Relationship with competition performance. *Med Sci Sports Exerc*, 37(3), 496-504.
- Girard, O., Lattier, G., Maffiuletti, N. A., Micallef, J. P., & Millet, G. P. (2008). Neuromuscular fatigue during a prolonged intermittent exercise: Application to tennis. *J Electromyogr Kinesiol*, 18(6), 1038-1046. doi:10.1016/j.jelekin.2007.05.005
- Holloszy, J. O., Kohrt, W. M., & Hansen, P. A. (1998). The regulation of carbohydrate and fat metabolism during and after exercise. *Front Biosci*, 3, D1011-1027.
- Kovacs, M. S. (2007). Tennis physiology: training the competitive athlete. *Sports Med*, 37(3), 189-198.
- Laursen, P. B. (2010). Training for intense exercise performance: high-intensity or high-volume training? *Scand J Med Sci Sports*, 20 Suppl 2, 1-10. doi:10.1111/j.1600-0838.2010.01184.x
- Laursen, P. B., & Jenkins, D. G. (2002). The scientific basis for high-intensity interval training: optimising training programmes and maximising performance in highly trained endurance athletes. *Sports Med*, 32(1), 53-73.
- Mendez-Villanueva, A., Fernandez-Fernandez, J., Bishop, D., Fernandez-Garcia, B., & Terrados, N. (2007). Activity patterns, blood lactate concentrations and ratings of perceived exertion during a professional singles tennis tournament. *Br J Sports Med*, 41(5), 296-300; discussion 300. doi:10.1136/bjism.2006.030536
- Seiler, K. S., & Kjerland, G. O. (2006). Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: is there evidence for an "optimal" distribution? *Scand J Med Sci Sports*, 16(1), 49-56. doi:10.1111/j.1600-0838.2004.00418.x
- Smekal, G., Pokan, R., von Duvillard, S. P., Baron, R., Tschann, H., & Bachl, N. (2000). Comparison of laboratory and "on-court" endurance testing in tennis. *Int J Sports Med*, 21(4), 242-249. doi:10.1055/s-2000-310
- Triolet, C., Benguigui, N., Le Runigo, C., & Williams, A. M. (2013). Quantifying the nature of anticipation in professional tennis. *J Sports Sci*, 31(8), 820-830. doi:10.1080/02640414.2012.759658
- Vergauwen, L., Spaepen, A. J., Lefevre, J., & Hespel, P. (1998). Evaluation of stroke performance in tennis. *Med Sci Sports Exerc*, 30(8), 1281-1288.
- White, A. T., & Schenk, S. (2012). NAD(+)/NADH and skeletal muscle mitochondrial adaptations to exercise. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 303(3), E308-321. doi:10.1152/ajpendo.00054.2012

[RECOMMENDED ITF TENNIS COACH CONTENT \(CLICK BELOW\)](#)

**Tennis**  **iCoach**

## ***Chapitre 12***

### ***Article 7- Effets d'un microcycle de répétition de sprints en hypoxie chez un jeune joueur professionnel.***

**Article 7- Shock microcycle of Repeated-sprint training in hypoxia and tennis performance: a case study in a rookie professional player.**

Brechbuhl C, Schmitt C, Millet G, Brocherie F. International Journal of Sports Science & Coaching.

## **Abstract**

The aim of this case study was to investigate the effects of a shock microcycle of repeated-sprint training in hypoxia (RSH) on physical fitness and tennis performance. One rookie professional tennis player performed repeated-sprint ability (RSA) and Yo-Yo Intermittent Recovery level 2 (YYIR2) tests before and after (+3 days and +21 days) 6 sessions of RSH (4 sets of 5 × ~6s repeated-shuttle sprint interspersed by ~24 s of passive recovery) practiced during a 14-day “in-season” period. Tennis performance was subjectively measured from match results and Association of Tennis Professionals (ATP) points obtained during four professional tournaments played before and after intervention. While no changes were found at +3 days post-RSH, improvements in physical fitness [single sprint time (-4.5%), RSA total time (-3.1%) and sprint decrement (-16.7%), as well as YYIR2 total distance covered (+ 21.4%)] were observable at +21 days post-RSH. Tennis performance obtained during the tournaments was better after intervention. From pre to post-RSH, the decreases in opponents’ ATP ranking during matches won ( $1109 \pm 334$  points vs.  $818 \pm 212$  points) and lost ( $499 \pm 68$  points vs.  $256 \pm 58$  points) revealed a stronger opposition. Consequently, a three-fold increase (from 4 to 12 ATP points gained from pre to post-RSH) in participant’s ATP ranking was recorded. In summary, a 14-day “in-season” shock microcycle including 6 sessions of repeated-sprint training in hypoxia revealed interesting effects in specific fitness and tennis performance in a rookie professional tennis player.

Keywords: Tennis, altitude, physical fitness, repeated-sprint ability, competition period, block periodization.

## **Introduction**

Tennis professional tour is characterized by a massive part of season dedicated to the competitions, i.e., tournaments' participations. With this calendar, optimizing the training time appears particularly determinant with a permanent search for the most specific and effective training methods (1). In order to overcome the limited time schedule, recent publications on intermittent sports such as football (2) or tennis (3) have shown that the use of shock microcycles leads to sport-specific performance improvements.

In this view, repeated-sprint training in hypoxia (RSH) has been proposed as a promising strategy in intermittent sports to improve sport-specific performance (4, 5). For instance, Gatterer et al. (6) reported that repeated shuttle-run sprint training is feasible in a normobaric hypoxic chamber of limited size (5 m width) and highlighted that a 12-days shock microcycle performed in hypoxia (~3300 m) provided a putative benefit on selected repeated-sprint outcomes (i.e., mean time) compared with similar training in normoxia. This was further accompanied by similar gains in specific aerobic fitness [i.e., Yo-Yo intermittent recovery test level 2 (YYIR2)] after both training modalities, suggesting that RSH did not blunt aerobic adaptations (6). Although one cannot rule out a placebo effect leading to a higher motivation and/or higher training intensity than usually, suggested RSH-related mechanisms were increased muscular perfusion, changed pH regulation and enhanced glycolytic activity for repeated-sprint outcomes (4), increased tissue oxygen extraction (7), citrate synthase activity and myoglobin content for YYIR2 (4). Moreover, RSH has been consistently shown as beneficial in different team sports [e.g., rugby (8), field-hockey (9)] and leads to an increase in best and mean repeated-sprint performance [for details, see (10)]. However, to date, no study has yet investigated the effect of RSH on tennis performance.

Regarding the fitness determinants of professional tennis (11), one may assume that RSH might rapidly induce beneficial adaptations and performance improvement. Therefore, the aim of this

case study was to investigate the effects of RSH intervention (6 sessions) over a 14-day “in-season” period on specific fitness and tennis performance in a rookie professional tennis player.

## Case report

### Participant

An 18-year-old rookie professional tennis player (classified in the top-10 of the combined Junior ranking of the International Tennis Federation during the season preceding the present study; body weight 67.0 kg; stature 179 cm; BMI 20.9 kg.m<sup>-2</sup>) voluntarily agreed to participate. At the time of the investigation, he had been training competitively for the past 8 years, and regularly participated in 8-12 training sessions per week (total training hours per week of 12-25 h) in a program that varies with the schedule of upcoming competition. The participant was informed of the experimental risks and gave his written voluntary informed consent for the tests and for the public reporting of his results. The study conformed to the Declaration of Helsinki, and was approved by the institutional review board.

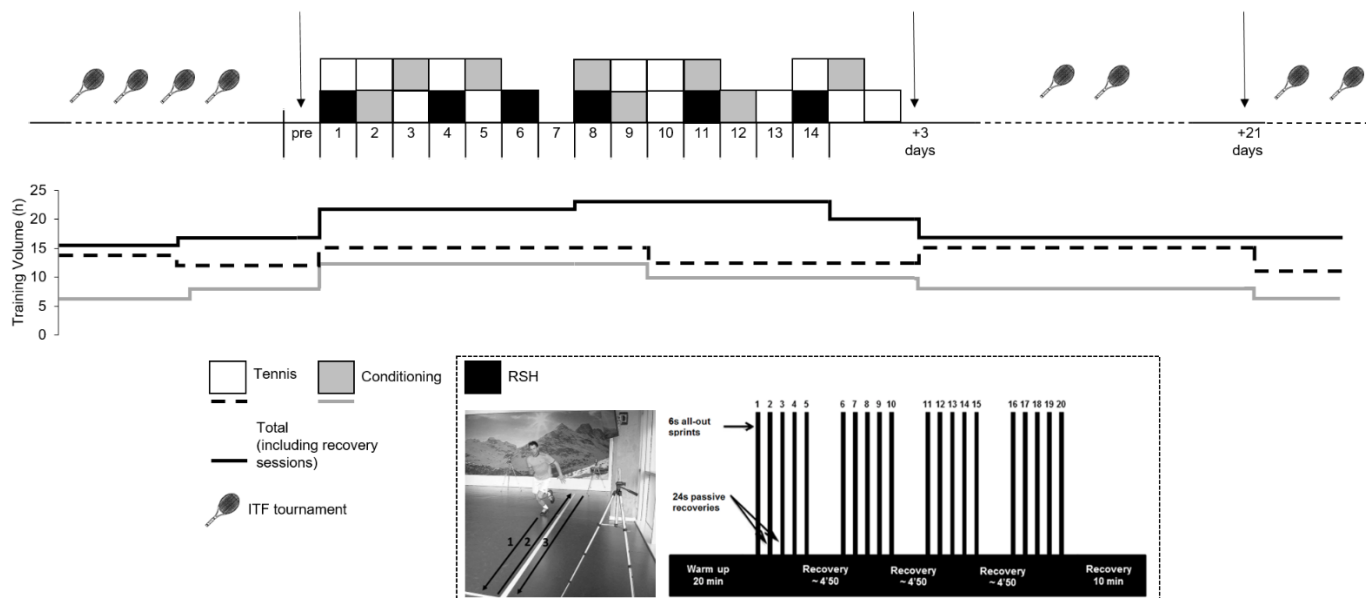


Figure 1. Overview of the 14-day “in-season” intervention and description of a typical session of repeated-sprint training in hypoxia (RSH).



## Time line

All tests (see below) were performed prior to onset of RSH training (pre), after 14 days of intervention (+3 days) and following 2 weeks of tournaments participation (+21 days). Experimental intervention is described in Figure 1. Compared to pre- and post-RSH intervention ( $18.5 \pm 4.0$  h and  $17.0 \pm 1.0$  h, respectively), the participant was submitted to an overall training volume of  $24 \pm 2.0$  h during the shock microcycle. Tennis-specific fitness level was assessed using testing battery which was used routinely during participant follow-up. Further, in order to compare the impact on tennis performance, match results from four professional (i.e., ITF Futures) tournaments played before and after intervention were collected.

## Tennis-specific fitness tests

Single straight-line 20 m sprint, repeated-sprint ability (RSA) ( $8 \times 20$  m – 20 s recovery) and YYIR2 performances were tested as described elsewhere (9). RSA was assessed using three scores: the best sprint time (RSAbest), the total sprint time (i.e., sum of the eight sprints; RSATT) and the sprint decrement score (12):  $S_{dec} (\%) = [(RSATT / (RSAbest \times 8)) - 1] \times 100$ . During the YYIR2 test, the test ended when the participant had failed to reach the finishing line in time for the second time and the total distance was then recorded.

## Tennis performance

To evaluate the tennis performance during professional (i.e., ITF Futures) tournaments, we considered the opponent's level [i.e., Association of Tennis Professionals (ATP) ranking] and the number of ATP points gained by the participant before and after RSH intervention. These two criteria are based on the ATP world tour ranking which is the conventional method of assessing the performance of professional tennis players. Briefly, points score is given to a player regarding the round reached during tournaments.

## Repeated-sprint training in hypoxia

During the 14-day “in-season” intervention period, the participant included 6 RSH sessions in his usual training routine (Figure 1). Briefly, each RSH session lasted ~1 h, including a 20-min warm-up, repeated-sprint training routine, and a 10-min cooling-down period. Specifically, RSH sessions consisted of 4 sets of  $5 \times \sim 6$ s repeated-shuttle sprint interspersed by ~24 s of passive recovery and were completed on an indoor synthetic tennis surface inside a 120 m<sup>2</sup> normobaric hypoxic training room (b-Cat, Netherlands) where ambient air was mixed with nitrogen (from pressurized tanks) to reduce FiO<sub>2</sub> to ~14.5% in order to simulate an altitude of 3000 m. Temperature and humidity were maintained at ~21°C and ~55% relative humidity. Participant was constantly reminded to exert “all-out” effort in trying to reach peak acceleration and to maintain the highest possible running speed for every sprint bout. Heart rate (HR; Polar Electro Oy, Kempele, Finland), arterial oxyhemoglobin (SpO<sub>2</sub>; GO2TM Achieve 9570-A, Nonin, Plymouth, MN, USA) and blood lactate concentration ([La]; Lactate Pro Analyser, Arkray Inc, Kyoto, Japan) were measured after each set (data not presented) and at the end of each RSH session. Ratings of perceived exertion (RPE; 6-20 and 0-10 Borg scales), overall perceived discomfort, perceived lower-limb discomfort, and perceived difficulty breathing (modified Borg CR10 scales) were collected at the end of each RSH sessions (13). RSH training loads were calculated as total session duration  $\times$  session RPE (14).

## Data analysis

Absolute and relative (percentage differences between pre, +3 days and +21 days post-RSH) values are presented by descriptive statistics. Probabilities were also calculated to establish whether the true difference was lower than, similar to, or higher than the smallest worthwhile difference or change (SWC,  $0.2 \times$  overall pooled SD per dependent variable). A qualitative

effect descriptor was assigned according to the likelihood of the change exceeding the SWC: 50-74% “possible”, 75-94% “likely”, 95-99% “very likely”, >99% “almost certainly” (15). Effects where the 90% confidence interval overlapped simultaneously the substantially positive and negative thresholds were deemed “unclear”.

Table 1. Physical fitness results before (pre) and after (+3 days and +21 days) 14 days “in-season” of repeated-sprint training in hypoxia (RSH) intervention.

	Pre	+3 days	+21 days
Single sprint time (s)	3.12	3.13	2.98
% of change from pre		+0.3%	-4.5%
% chances to be greater/similar/smaller than the SWC		39/39/22 <i>unclear</i> difference	2/1/97 <i>very likely</i> smaller
RSA <sub>best</sub> (s)	3.10	3.13	3.02
% of change from pre		+1.0%	-2.6%
% chances to be greater/similar/smaller than the SWC		78/12/10 <i>unclear</i> difference	3/1/96 <i>very likely</i> smaller
RSA <sub>TT</sub> (s)	25.65	25.79	24.85
% of change from pre		+0.6%	-3.1%
% chances to be greater/similar/smaller than the SWC		89/11/0 <i>trivial</i> difference	0/0/100 <i>almost certainly</i> smaller
S <sub>dec</sub> (%)	3.43	3.00	2.86
% of change from pre		-12.6%	-16.7%
% chances to be greater/similar/smaller than the SWC		2/2/96 <i>very likely</i> smaller	1/1/98 <i>very likely</i> smaller
YYIR2 distance (m)	560	440	680
% of change from pre		-21.4%	+21.4%
% chances to be greater/similar/smaller than the SWC		0/0/100 <i>almost certainly</i> smaller	100/0/0 <i>almost certainly</i> higher

## Results

Physiological responses at the end of RSH sessions corresponded to an averaged HR, SpO<sub>2</sub> and [La] of  $168 \pm 6$  bpm;  $87.8 \pm 1.0$  %;  $9.9 \pm 1.9$  mmol.L<sup>-1</sup>, respectively. Session RPEs were  $15.6 \pm 1.1/7.0 \pm 0.8$  au, corresponding to training load of  $935 \pm 68/418 \pm 50$  au. Overall perceived discomfort ( $6.8 \pm 0.8$  au), perceived lower-limb discomfort ( $7.3 \pm 0.8$  au) and difficulty breathing ( $7.0 \pm 0.9$  au) indicated “very severe” scores.

All specific fitness and tennis performance results are summarized in Table 1 and Figure 2.

While no positive changes were found at +3 days post-RSH, improvements in physical fitness [single sprint time (-4.5%, very likely), RSA total time (-3.1%, almost certainly) and sprint decrement (-16.7%, very likely), as well as total distance covered during YYIR2 (+ 21.4%, almost certainly)] were observable at +21 days post-RSH. Tennis performance achieved during the tournaments was improved after intervention. From pre to post-RSH, the decreases in opponents' ATP ranking during matches won ( $1109 \pm 334$  points vs.  $818 \pm 212$  points; 0/0/100, almost certainly) and lost ( $499 \pm 68$  points vs.  $256 \pm 58$  points; 0/0/100, almost certainly) revealed a stronger opposition. Consequently, a three-fold increase (from 4 to 12 ATP points gained) in participant's ATP ranking was recorded.

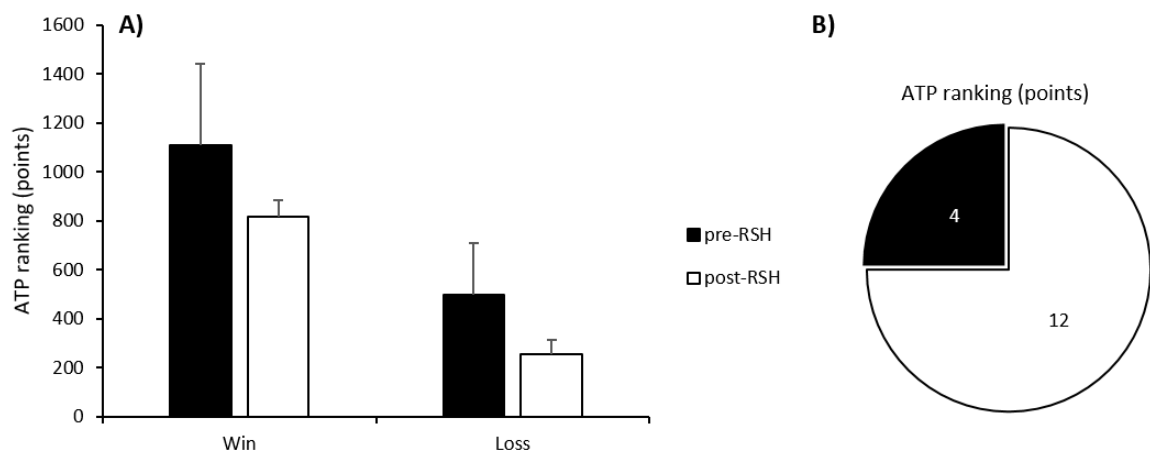


Figure 2. Comparison of opponent's ATP rankings (A) and participant's ATP points gained (B) before (pre) and after (+21 days) 14 days "in-season" of repeated-sprint training in hypoxia (RSH) intervention.

## Discussion

The main finding of this case study is that a 14-day "in-season" shock microcycle including 6 sessions of RSH revealed interesting effects in specific fitness and tennis performance in a rookie professional tennis player. Notably, gains in sport-specific fitness were observed 21 days after cessation of additional RSH, whereas no change was noted 3 days after intervention. This

may have accompanied the greater tennis performance recorded during the professional tournaments played after intervention (i.e., between +3 days and +21 days post-RSH).

Although training overreaching/overtraining's risk may exist, periodization of intensive sessions is required to generate physiological adaptations and sport-specific performance enhancement (16, 17). Here, the underperformance observed at +3 days suggests a temporary state of fatigue which was compensated after sufficient recovery period (i.e., performance improvement at +21 days). These delayed benefits are in line with the specific timing recommendations for the “classical” hypoxic training methods (e.g., living high-training high or living high-training low) with a positive window after 2–3 weeks of sea level training, after return from altitude training before a prime competition (18). Therefore, this recently developed (7) RSH method seems suitable and effective to improve tennis-specific performance as previously demonstrated in various team-sports [rugby (8), football (6), field-hockey (9)].

While it appears in line with the findings of Gatterer et al. (6) using similar shock microcycle and exercise mode (i.e., 12-day repeated shuttle-sprint training in hypoxia), as well as with a recent meta-analysis on the effects of RSH (vs. similar normoxic training) on normoxic sport-specific performance (10), it seems that the shuttle-sprinting mode used for RSH may play a different role than straight-line sprinting mode on transient fatigue development. Based on our data, we assume that the inclusion of change of direction with successive deceleration/acceleration phases during repeated sprints is likely to increase the mechanical (i.e., stride patterns and/or leg stiffness) and peripheral [i.e., active bi-articular leg and core muscles] demands resulting in greater metabolic load (e.g., lactate accumulation) (19). Overall, this may slightly have altered RSH tolerance (13) without compromising long-term physiological adaptations (i.e., upregulation of the glycolytic activity, higher ability to resynthesize phosphocreatine and higher oxygen utilization) and physical fitness enhancement (4, 9).

Despite our limited understanding of the dose-response relationships between the training load and training-induced changes in physical fitness and tennis performance, the additional effects of RSH on official tennis performance highlights its potential effectiveness to improve tennis fatigue resistance (20). The use of repeated shuttle sprints likely mimicking on-court movements could have led to positive changes in match performance, with a possible transfer of fitness gains [i.e., RSA-related outcomes, agility and power (not measured here) and aerobic capacity] on technical skill (i.e., advanced shots and stroke efficiency maintenance). Without undermining the importance of fitness attributes, tennis performance is multifactorial and integrates an array of complex physical, physiological, cognitive and psychological processes (21). As such, further tennis-related RSH research is encouraged to employ robust performance measures and a multi-dimensional approach to tennis performance. The inclusion of on-court tennis specific test (22) and perceptual-cognitive skills (e.g., anticipatory and decision-making capacities) deserve future examination.

From a practical point of view, this case report can be used as a handy script for tennis players preparing for competition. Detailed and periodized repeated-sprint training in hypoxia (RSH) microcycle for 14-day “in-season” period is provided and can be used by staff involved in highly-trained athletes. By focusing on RSH as described with combination of both conditioning and tennis training, an increase in performance can be expected. In addition, relevant tests and related reference values are provided for individual adjustments to be done according to the needs and capacity analysis.

## Conclusion

In summary, a 14-day “in-season” shock microcycle including 6 sessions of repeated-sprint training in hypoxia revealed interesting effects in physical fitness and tennis performance in a rookie professional tennis player. However, gains in physical fitness were observed 21 days

after cessation of the last session, while remaining unaltered or even negatively affected shortly (3 days) post-intervention. The long-term effect on specific fitness suggests a greater fatigue resistance which may have resulted in greater tennis performance after intervention. Future investigations on special focused hypoxic training block periodization in intermittent sports are warranted.

#### Acknowledgements

The authors would like to sincerely thank the player for participating in this case study and consenting to its publication.

#### Declaration of Conflicting Interests

No potential conflict of interest was reported by the authors.

#### Funding

The authors have no sources of funding to disclose.

#### References

1. Fernandez-Fernandez J, Sanz-Rivas D, Sanchez-Munoz C, de la Aleja Tellez JG, Buchheit M, Mendez-Villanueva A. Physiological Responses to On-Court vs Running Interval Training in Competitive Tennis Players. *J Sports Sci Med.* 2011;10(3):540-5.
2. Christensen PM, Krstrup P, Gunnarsson TP, Kiilerich K, Nybo L, Bangsbo J. VO<sub>2</sub> kinetics and performance in soccer players after intense training and inactivity. *Med Sci Sports Exerc.* 2011;43(9):1716-24.

3. Fernandez-Fernandez J, Sanz-Rivas D, Sarabia JM, Moya M. Preseason Training: The Effects of a 17-Day High-Intensity Shock Microcycle in Elite Tennis Players. *J Sports Sci Med.* 2015;14(4):783-91.
4. Faiss R, Girard O, Millet GP. Advancing hypoxic training in team sports: from intermittent hypoxic training to repeated sprint training in hypoxia. *British journal of sports medicine.* 2013;47 Suppl 1:i45-50.
5. Girard O, Amann M, Aughey R, Billaut F, Bishop DJ, Bourdon P, et al. Position statement--altitude training for improving team-sport players' performance: current knowledge and unresolved issues. *Br J Sports Med.* 2013;47 Suppl 1:i8-16.
6. Gatterer H, Klarod K, Heinrich D, Schlemmer P, Dilitz S, Burtscher M. Effects of a 12-day maximal shuttle-run shock microcycle in hypoxia on soccer specific performance and oxidative stress. *Applied physiology, nutrition, and metabolism = Physiologie appliquee, nutrition et metabolisme.* 2015;40(8):842-5.
7. Faiss R, Leger B, Vesin JM, Fournier PE, Eggel Y, Deriaz O, et al. Significant molecular and systemic adaptations after repeated sprint training in hypoxia. *PLoS One.* 2013;8(2):e56522.
8. Galvin HM, Cooke K, Sumners DP, Mileva KN, Bowtell JL. Repeated sprint training in normobaric hypoxia. *British journal of sports medicine.* 2013;47 Suppl 1:i74-9.
9. Brocherie F, Millet GP, Hauser A, Steiner T, Rysman J, Wehrin JP, et al. "Live High-Train Low and High" hypoxic training improves team-sport performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2015;47(10):2140-9.
10. Brocherie F, Girard O, Faiss R, Millet GP. Effects of Repeated-Sprint Training in Hypoxia on Sea-Level Performance: A Meta-Analysis. *Sports Med.* 2017.



11. Pereira TJ, Nakamura FY, de Jesus MT, Vieira CL, Misuta MS, de Barros RM, et al. Analysis of the distances covered and technical actions performed by professional tennis players during official matches. *Journal of sports sciences*. 2017;35(4):361-8.
12. Girard O, Racinais S, Kelly L, Millet GP, Brocherie F. Repeated sprinting on natural grass impairs vertical stiffness but does not alter plantar loading in soccer players. *Eur J Appl Physiol*. 2011;111(10):2547-55.
13. Brocherie F, Millet GP, Girard O. Psychophysiological Responses to Repeated-Sprint Training in Normobaric Hypoxia and Normoxia. *Int J Sports Physiol Perform*. 2017;12(1):115-23.
14. Foster C, Florhaug JA, Franklin J, Gottschall L, Hrovatin LA, Parker S, et al. A new approach to monitoring exercise training. *J Strength Cond Res*. 2001;15(1):109-15.
15. Batterham AM, Hopkins WG. Making meaningful inferences about magnitudes. *Int J Sports Physiol Perform*. 2006;1:50-7.
16. Foster C. Monitoring training in athletes with reference to overtraining syndrome. *Med Sci Sports Exerc*. 1998;30(7):1164-8.
17. Schmitt L, Hellard P, Millet GP, Roels B, Richalet JP, Fouillot JP. Heart rate variability and performance at two different altitudes in well-trained swimmers. *Int J Sports Med*. 2006;27(3):226-31.
18. Millet GP, Roels B, Schmitt L, Woorons X, Richalet JP. Combining hypoxic methods for peak performance. *Sports Med*. 2010;40(1):1-25.
19. Brocherie F, Millet GP, Girard O. Neuro-mechanical and metabolic adjustments to the repeated anaerobic sprint test in professional football players. *Eur J Appl Physiol*. 2015;115(5):891-903.

20. Smekal G, Pokan R, von Duvillard SP, Baron R, Tschan H, Bachl N. Comparison of laboratory and "on-court" endurance testing in tennis. *International journal of sports medicine*. 2000;21(4):242-9.
21. Hornery DJ, Farrow D, Mujika I, Young W. Fatigue in tennis: mechanisms of fatigue and effect on performance. *Sports Med*. 2007;37(3):199-212.
22. Brechbuhl C, Girard O, Millet GP, Schmitt L. On the Use of a Test to Exhaustion Specific to Tennis (TEST) with Ball Hitting by Elite Players. *PLoS One*. 2016;11(4):e0152389.

#### Conflict of interest

The authors report no conflicting interests.

#### Acknowledgments

The authors would like to express their gratitude to the participant, who voluntarily agreed to contribute.

## ***Chapitre 13***

### ***Article 8- Effets de sprints répétés en hypoxie chez des joueurs de tennis bien entraînés***

**Article 8- Effects of Repeated Sprint in Hypoxia on tennis-specific performance in well-trained players.**

Brechbuhl C, Brocherie F, Millet G, Schmitt C. En revision, Sports Medicine International Open.

## **Abstract**

This study examined the physiological, physical and technical responses to repeated-sprint training in normobaric hypoxia [RSH, inspired fraction of oxygen ( $\text{FiO}_2$ ) 14.5%] vs. normoxia (RSN,  $\text{FiO}_2$  20.9%). Within 12 days, eighteen well-trained tennis players (RSH,  $n = 9$  vs. RSN,  $n = 9$ ) completed five specific repeated-sprint sessions which consisted of four sets of 5 maximal shuttle-run sprints. Testing sessions included repeated-sprint ability and Test to Exhaustion Specific to Tennis (TEST). TEST's maximal duration to exhaustion and time to the second ventilatory threshold improvements were higher in RSH ( $+14.6 \pm 3.7\%$ ,  $p < 0.001$ ;  $+23.6 \pm 11.3\%$ ,  $p < 0.001$ , respectively) than in RSN ( $+7.9 \pm 5.1\%$ ,  $p = 0.002$ ;  $+10.9 \pm 8.3\%$ ,  $p = 0.004$ ). Significant interaction ( $p = 0.003$ ,  $\text{ES} = 0.59$ ) was found for ball accuracy with greater improvement in RSH ( $+13.8 \pm 12.7\%$ ,  $p = 0.013$ ) vs. RSN ( $-4.6 \pm 9.1\%$ ,  $p = 0.15$ ]. A correlation ( $r = 0.59$ ,  $p < 0.001$ ) was observed between change in ball accuracy and TEST's time to exhaustion. Greater improvement in some tennis-specific physical and technical parameters was observed after only 5 sessions of RSH vs. RSN in tennis players.

**Keywords:** Sport-Specific fitness; Hypoxia; Repeated-sprint ability;  $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ ; Ball accuracy; Tennis Performance.

## **Introduction**

In tennis, players must possess well-developed technical and tactical skills and high fitness in order to cope with the physical demands of the game in competition [19,29]. It has been suggested that competitive tennis players need a mixture of fitness qualities such as speed, agility, repeated-sprint ability (RSA), and power, combined with well-developed aerobic fitness to achieve high levels of performance [15]. Tennis competition has average points lasting less than 10 s, with rest periods of approximately 20 s between points and 90 s after every second game [28]. Thus, the training of competitive tennis players should focus on improving their ability to repeatedly perform high-intensity efforts and to recover rapidly between them [35]. For these reasons, physical exercise aiming to enhance both aerobic and anaerobic performance should be part of any tennis training program. Because training time optimization is paramount due to intensive competition calendars, providing an ideal conditioning design is a significant challenge.

Improvement in fitness such as sprinting speed is generally thought to be training specific, with specially designed speed programs shown to improve neuromuscular qualities [9,41], whereas repeated-sprint training programs have shown higher impact on single and repeated shuttle sprint performance [8,16]. Different studies have explored the effects of repeated-sprint training in hypoxia (RSH) on high-intensity intermittent sport performance [6,18,22] and its putative benefits compared with similar training in normoxia (RSN) [13]. But none specifically investigated tennis-related performance. RSH appears as a promising training strategy in racquet sports to improve match-related performance [12]. With RSH, enhanced blood perfusion levels due to the compensatory vasodilation in response to the decreased oxygen content and improved behavior of fast-twitch fibers are expected compared with RSN [10,13,14]. Furthermore, exercise prescription theory dictates that exercise training prescription should be as specific as possible to facilitate appropriate physiological adaptations [37].

Therefore, repeated-sprint training protocols should be based on work-to-rest ratio's of actual repeat sprint ability while playing the sport (adding hypoxia to this training serves to induce a larger metabolic stimulus resulting in greater adaptation). The ability to repeat sprints [i.e. repeated-sprint ability (RSA)] describes the aptitude of an athlete to recover and maintain maximal effort during subsequent sprints. Although debated [39], this attribute is considered important to various intermittent activities (e.g. rugby, soccer, Australian football, ice/field hockey, tennis) [2].

RSH to improve endurance performance has also resulted in conflicting results. Galvin et al. [17] found significantly improved endurance performance while Hamlin et al. [23] didn't by using the same test (Yo-Yo intermittent recovery test level 1) after repeat-sprint training in rugby players. More recently, Jones B. et al. [25] reported significantly faster final running velocities in female field hockey players during a 30–15 intermittent field test after RSH compared to control conditions, whereas others have found little effect on 20m shuttle run performance post hypoxic repeat-sprint training in Australian football athletes [21]. The effect of a repeat-sprint training on subsequent specific test to exhaustion has not been researched in tennis to date.

Using a double-blind controlled design, this study aimed to investigate the effects of a tennis specific RSH vs. RSN in well-trained players. Based on the effect of RSH studies [13,17,18], we hypothesized that RSH would provide greater gains on repeated-sprint ability (RSA)-related parameters than RSN. We also assumed that RSH would induce a better resistance to fatigue in tennis-specific intermittent tasks, observable mainly near exhaustion.

## **Methods**

### **Participants**

Competitive tennis players (16 males and 4 females) volunteered to participate in the study. They were all well-trained [*i.e.*, international tennis number (ITN): 1 (elite) to 2 (advanced player)]. The study was approved by the local ethical committees (French National Conference of Research Ethics Committees; Dijon) that was performed in accordance with the ethical standards reported [24] and conformed to the recommendations of the Declaration of Helsinki. Participants gave their written informed consent after having been fully informed about the experimental procedure. Exclusion criteria were any history of altitude-related sickness or health risks that would have compromised the participant's safety during the experiment.

### **Experimental design**

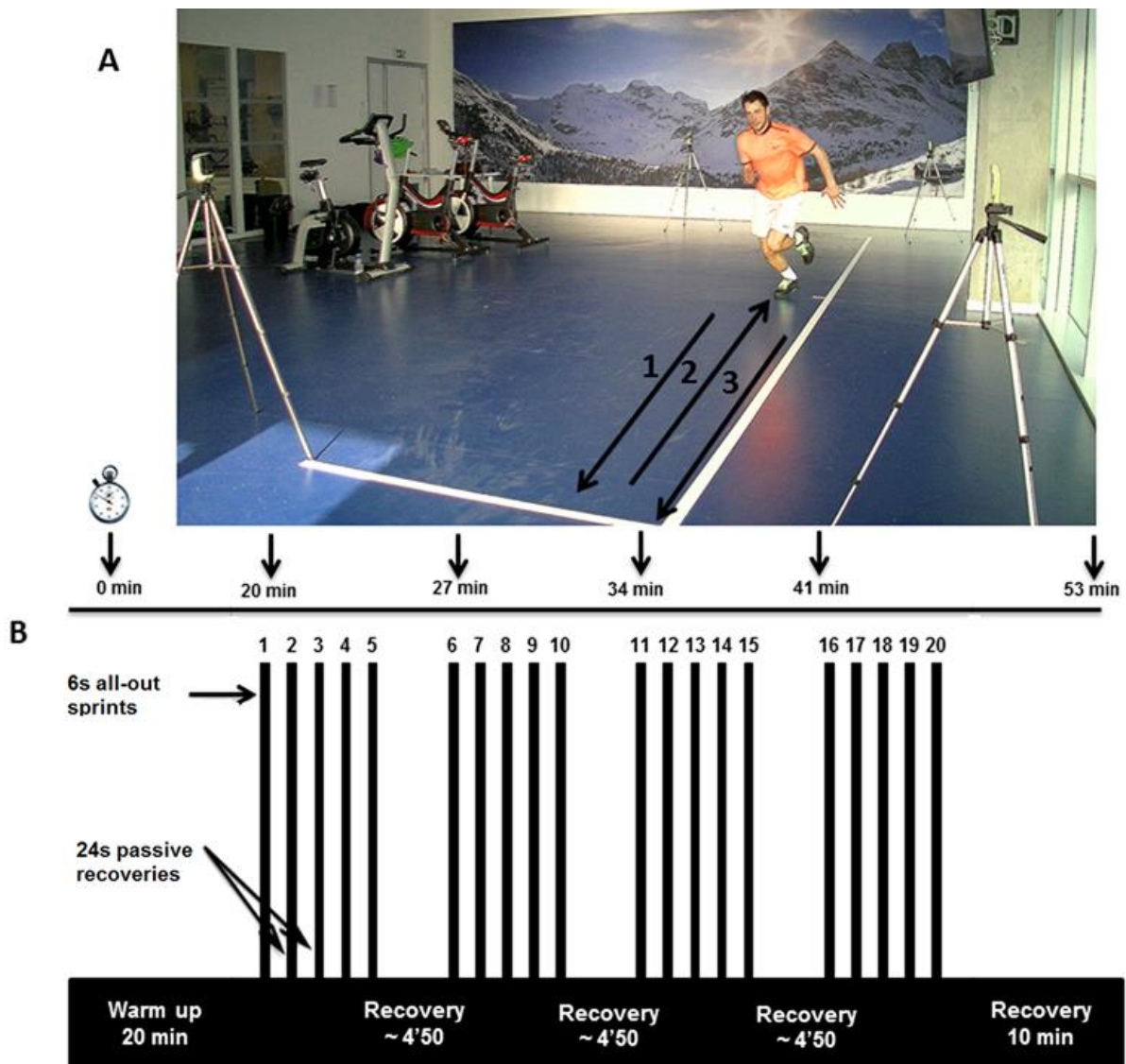
Group assignments were blinded both to the participants and all investigators (except the main one). Participants were told that they were all training in normobaric hypoxia but had no accurate information about the simulated altitude levels set in the hypoxic room. According to their competitive tennis level (known from their national ranking), they were matched into pairs and then randomly assigned into the following training groups: RSH (n = 10; 8 males and 2 females; age  $24.8 \pm 5.1$  years; weight  $68.4 \pm 11.2$  kg; height  $1.79 \pm 0.07$  m) or RSN (n = 10; 8 males and 2 females; age  $22.8 \pm 4.1$  years; weight  $77.5 \pm 10.7$  kg; height  $1.85 \pm 0.07$  m). During the study, 2 female participants (1 from each group) were withdrawn due to injury. To determine the efficacy of the blinding process, participants were requested to indicate on a Likert scale (100 m marks from 0 to 4000 m) the expected altitude level after each training session.

Experimental protocol included one testing session performed in normoxia before (Pre-) and after (Post-) a 12-day RSH/RSN training period (2 and 3 sessions per week, respectively). The time of day for testing was controlled and matched both within and between groups.



## Specific training sessions

All specific training sessions were performed in an air-conditioned (21°C, ~55% relative humidity) normobaric hypoxic room (size 15.04 m × 8.54 m; b-Cat®, Tiel, Netherlands) (**Fig. 1**). For RSH, the inspired fraction of oxygen ( $F_{iO_2}$ ) was set at 14.5%, equivalent to ~3000 m, shown to not reduce peak power output during repeated-sprint efforts [22]. For careful blinding purpose, the hypoxic system was also switched on during RSN sessions ( $F_{iO_2}$  20.9% equivalent to ~200 m) in order to create similar background noise.



**Figure 1:** Hypoxic room fitted for repeated shuttle-run maximal sprint training (A) and description of a typical training session (B).

### **Specific aerobic capacity**

Participants' physical performance was assessed using a testing battery performed in normoxia in a well-ventilated room at a constant temperature of  $\sim 21^{\circ}\text{C}$  and  $\sim 55\%$  relative humidity. Pre and Post-testing sessions were completed in the exact same sequence: (i) 20 min of standardized warm-up including athletic and acceleration drills; (ii), RSA test; and (iii) after 40 min of rest, an incremental field test up to exhaustion [*i.e.*, the so-called 'test to exhaustion specific to tennis' (TEST)] [3]. Participants were asked to arrive at the testing sessions in a rested and hydrated state (at least 3 h after a meal and having avoided strenuous training in the preceding 24 h).

TEST [3,4] was selected to assess participants' high-intensity intermittent performance. Briefly, TEST consisted of hitting balls thrown by a 'Hightof' ball machine (Echouboulains, France) at constant velocity [5], alternating forehand and backhand strokes. TEST has been previously reported to be relevant for tennis field testing and training purposes [3]. The TEST started with a 2-min 'habituation'/warming-up phase where a ball frequency (BF) of  $16 \text{ shots}\cdot\text{min}^{-1}$  with balls thrown to the central area of the court (minimal lateral displacement) was adopted. After 1 min of passive rest (quiet standing), the first TEST stage began with a BF of  $10 \text{ shots}\cdot\text{min}^{-1}$ , thereafter increased by  $+2 \text{ shots}\cdot\text{min}^{-1}$  every min until the stage corresponding to a BF of  $22 \text{ shots}\cdot\text{min}^{-1}$ . Thereafter, increment in BF was set at  $+1 \text{ shots}\cdot\text{min}^{-1}$  until exhaustion [3]. After each 1-min stage, a 30-s passive recovery break (quiet standing) was implemented.

Participants had to hit balls cross-court in a prescribed pattern. Slice strokes were not allowed because of their potential influence on ball positioning and therefore on TEST performance and associated physiological responses. They were asked to perform TEST as closely as what they would do during official competitions. While they can visualize the areas in which they were aiming to play, they were told to "*hit the ball with the best possible speed/accuracy ratio*". Further, stroke involvement was motivated by 'live' (immediate) feedback. Based on previous

results reporting range of ball velocities (BV) between 86 and 120 km.h<sup>-1</sup> (sub-maximum to maximum strokes), BV < 80 km.h<sup>-1</sup> was chosen as the criteria for unsuccessful BV and ball accuracy (BA) [*i.e.*, 50% of balls landing outside the target zone, in accordance with the results obtained with elite players [4] at the end of each stage completed.

TEST ended with participants' voluntary exhaustion or was stopped by the investigators if: (i) participants felt exhausted or failed to reach and hit the ball twice in a row or (ii) they were no longer able to perform strokes with an acceptable execution technique and a demise in BV/BA, as determined by one experienced tennis national coach. Specifically, subjects were given a warning the first time they disrespected the rules, and were stopped on the second warning. TEST's performance was measured as total time to exhaustion (TTE).

### **Evaluation of groundstroke performance**

During TEST, groundstroke production was assessed via two main variables: BV and BA. BV (km.h<sup>-1</sup>) was measured with the Playsight<sup>®</sup> system (Kokhav Ya'ir, Israēl). Playsight<sup>®</sup> which was approved by the International Tennis Federation (ITF) as a tennis player analysis technology for all ITF-sanctioned tournaments. For instance, correlations were reported between competitive level and BA ( $r = 0.61$ ) [1] or stroke ratings (*i.e.*, a surrogate of BA) ( $r = 0.94$ ) [40]. BV and BA data were averaged for each TEST stage. Finally, because BV and BA better reflect the overall stroke precision in tennis when combined, the tennis performance (TP index) [4] was calculated as the product of these two variables. To determine the mean of each parameter measured over the entire TEST, calculation was based on the values obtained for each TEST stage.

### **Physiological measurements**

During TEST, expired air was analyzed (breath-by-breath measurements) for oxygen consumption ( $\dot{V}O_2$ ) using a portable gas analyzer (Metamax II CPX system, Cortex<sup>®</sup>, Leipzig,

Germany). HR was checked continuously and [La] was measured at baseline, during the 30-s recovery periods after every stage until a value of 4 mmol.L<sup>-1</sup> was obtained and thereafter every 2 stages, and 15 s after TEST exhaustion to assess maximal blood lactate concentration ([La]<sub>max</sub>). The detection of the second ventilatory threshold (VT2) was done by analyzing the breakpoints of the ventilatory O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> equivalents [38].

### **Repeated-sprint ability**

The RSA test consisted of ten 20-m sprints departing every 20 s performed in a back and forth format. Participants had to complete the distance in a straight line as fast as possible. Sprint times were measured to the nearest 0.01 s using photocells connected to an electronic timer (Witty, Microgate, Bolzano, Italy). During the first sprint, they were required to achieve at least 95% of their criterion score (*i.e.*, defined as the best of three single 20-m sprints interspersed with 2 min of recovery) as a check of any pacing strategy. All of the athletes satisfied this criterion score. Three scores were calculated during the RSA test: best sprint time (RSA<sub>best</sub>), cumulated sprint time (RSA<sub>TT</sub>) and percentage of sprint decrement calculated as follows (S<sub>dec</sub>) [20] :  $[(RSA_{TT}) / (RSA_{best} \times 10) - 1] \times 100$  [20]. Heart rate (HR) was recorded continuously (Suunto Ambit2<sup>®</sup>, Vantaa, Finland) and 25 µl capillary blood samples were taken from fingertip and analyzed for lactate concentration ([La]) (LT-1710, Arkray<sup>®</sup>, Japan) 3 min after the end of the RSA test.

### **Statistical analysis**

Data is presented as mean or changes (%) with standard deviation ( $\pm$  SD) unless otherwise stated. One-way ANOVA was used to compare the absolute values between Pre- and Post-training whereas relative changes between groups were assessed through a student t-test. Two-way ANOVA with repeated measures [Time (Pre- vs. Post-)  $\times$  Condition (RSH vs. RSN)] was

used to compare data. Pairwise differences were identified using the Tukey post hoc analysis procedure adjusted for multiple comparisons. ANOVA assumptions were verified before all statistical analyses. For each ANOVA, effect size (ES) was calculated (Cohen's d) with the following criteria: an ES of <0.2 is classified as a trivial, 0.2 to 0.4 as a small, 0.5 to 0.7 as a moderate and >0.8 as a large effect. Pearson's product moment correlation analysis was employed to determine the relationships between technical parameters and TTE relative changes. The following criteria was adopted to interpret the magnitude of *r*: <0.1, trivial; 0.1-0.3, small; 0.3-0.5, moderate; 0.5-0.7, large; 0.7-0.9, very large; and 0.9-1.0, almost perfect. The null hypothesis was rejected at *P* < 0.05. Statistical analysis was performed using Sigmaplot 3.5 software (Systat Software, San Jose, CA).

Table 1. Comparison of performance (TTE) and physiological ( $\dot{V}O_{2max}$ ,  $HR_{max}$ ,  $VE_{max}$ ,  $[La]_{max}$ , time to VT2) variables between RSH and RSN groups.

	RSH			RSN			ANOVA main effects (ES)		
	Pre-	Post-	Difference (%)	Pre-	Post-	Difference (%)	Time	Condition	Interaction (Time-Condition)
TTE (s)	592 ± 76	679 ± 91	<b>14.6 ± 3.7***</b>	581 ± 78	627 ± 88	<b>7.9 ± 5.1**</b>	<b>&lt; 0.001 (0.19)</b>	0.425 (1.24)	<b>0.007 (0.11)</b>
$\dot{V}O_{2max}$ (mL.min <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> )	58.1 ± 6.4	59.0 ± 5.7	1.6 ± 3.9	52.9 ± 3.7	52.1 ± 5.2	-1.7 ± 5.3	0.994 (0.19)	<b>0.002 (1.24)</b>	0.636 (0.11)
$HR_{max}$ (beats.min <sup>-1</sup> )	195 ± 9	193 ± 10	-0.8 ± 1.6	196 ± 7	194 ± 8	-1.1 ± 1.7	0.528 (0.09)	0.803 (0.24)	0.924 (0.04)
$VE_{max}$ (L.min <sup>-1</sup> )	134 ± 21	132 ± 19	-1.3 ± 5.5	144 ± 14	146 ± 15	+1.4 ± 6.1	0.977 (0.01)	<b>0.037 (0.77)</b>	0.739 (0.01)
$[La]_{max}$ (mMoles.L <sup>-1</sup> )	12.0 ± 4.3	11.8 ± 5.5	-0.8 ± 29.8	11.0 ± 2.8	10.2 ± 1.7	-3.4 ± 29.0	0.682 (0.10)	0.318 (0.25)	0.785 (0.07)
Time to VT2	373 ± 65	460 ± 84	<b>23.6 ± 11.3***</b>	386 ± 43	426 ± 36	<b>10.9 ± 8.4**</b>	<b>&lt; 0.001 (1.02)</b>	0.718 (0.25)	<b>0.018 (0.34)</b>

Values are mean ± SD. Significant differences between Pre- and Post- absolute data (\* *p* < 0.05, \*\* *p* < 0.01, \*\*\* *p* < 0.001) are in bold. Statistical Analysis is based on absolute values.

TTE, total time to exhaustion;  $\dot{V}O_{2max}$ , maximal oxygen uptake;  $HR_{max}$ , maximal oxygen uptake ;  $VE_{max}$ , maximal ventilation;  $[La]_{max}$ , maximal lactate concentration; VT2, second ventilatory threshold.

## Results

### Efficacy of the blinding procedure

Participants were not able to identify the group they were assigned to [*i.e.*, they indicated similar simulated altitude:  $2663 \pm 451$  m (range, 1900-3000 m) and  $2422 \pm 745$  m (range, 1000-3500 m) for RSH and RSN, respectively].

### Aerobic capacity

The physiological responses to the on-court endurance test are summarized in **Table 1**. TTE and time to VT2 increased from Pre- to Post-training for RSH ( $+15 \pm 4\%$ ,  $p < 0.001$  and  $+24 \pm 11\%$ ,  $p < 0.001$ , respectively) and RSN ( $+8 \pm 5\%$ ,  $p = 0.002$  and  $+11 \pm 8\%$ ,  $p = 0.004$ ). Significant interactions between time and condition were found for TTE ( $p = 0.007$ ,  $ES = 0.108$ ) and time to VT2 ( $p = 0.02$ ,  $ES = 0.34$ ) (**Table 1**).

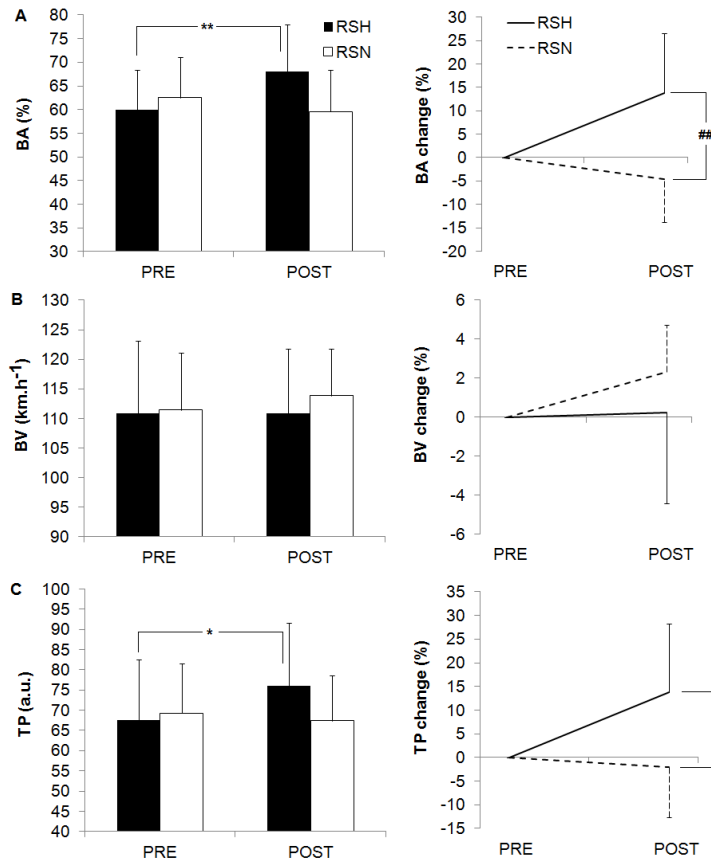
No significant interactions were found for the rest of outcome variables analyzed.

### Technical parameters

In reference to Pre-, BV did not significantly improve ( $+0.2 \pm 4.6\%$ ,  $p = 0.99$  for RSH, and  $+2.3 \pm 2.4\%$ ,  $p = 0.2$  for RSN, respectively) throughout the whole test (**Fig. 2B**) and at  $100\% \dot{V}O_{2\max}$  ( $-4.6 \pm 9.5\%$ ,  $p = 0.165$  vs.  $-0.6 \pm 5.5\%$ ,  $p = 0.649$ ).

Significant interactions were found for BA ( $p = 0.003$ ,  $ES = 0.59$ ) and TP ( $p = 0.02$ ,  $ES = 0.38$ ) (**Fig. 2A**, **Fig. 2C**) in RSH. While no changes were observed in RSN ( $-4.6 \pm 9.1\%$ ,  $p = 0.15$  and  $-2.1 \pm 10.5\%$ ,  $p = 0.44$  for BA and TP, respectively), BA and TP significantly increased from Pre- to Post- in RSH ( $+13.8 \pm 12.7\%$ ,  $p = 0.013$  and  $+13.8 \pm 14.4\%$ ,  $p = 0.03$ ). Similarly,  $BA_{\max}$  and  $TP_{\max}$  at  $100\% \dot{V}O_{2\max}$  were further increased in RSH ( $+33.6 \pm 37.3\%$ ,  $p = 0.01$  and  $+28.0 \pm 41.8\%$ ,  $p = 0.04$ ) vs. RSN ( $+5.1 \pm 23.8\%$ ,  $p = 0.59$  and  $+3.7 \pm 22.4\%$ ,  $p = 0.70$ ).

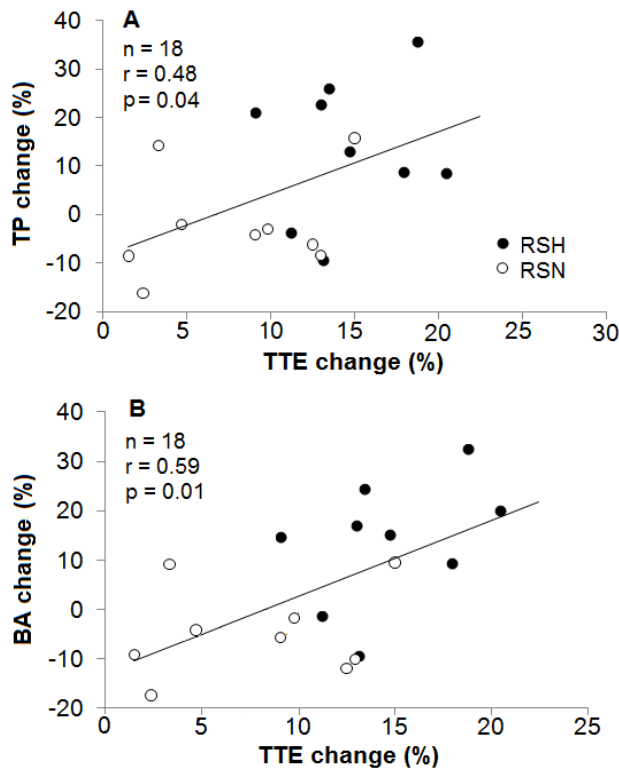
Significant small to moderate correlations were found between TP and TTE ( $r = 0.48$ ,  $p = 0.04$ ) (Fig. 3A), and between changes in BA throughout the whole test and TTE ( $r = 0.59$ ,  $p = 0.01$ ) (Fig. 3B).



**Figure 2:** Comparison within and between type of intervention (RSH vs. RSN) and changes in ball velocity (BV) (A), ball accuracy (BA) (B) and tennis performance index (TP) (C). \*  $P < 0.05$ , significantly different from Pre-. \*\*  $P < 0.01$ , significantly different from Pre-. \*\*\*  $P < 0.001$ , significantly different from Pre-. #  $P < 0.05$ , significant time  $\times$  condition interaction. ##  $P < 0.01$ , significant time  $\times$  condition interaction.

### Sprint-performance parameters

$RSA_{Best}$  and  $RSA_{TT}$  were significantly different between groups (condition effect). Pre- and Post-test performance results are summarized in Table 2. Concerning the effect of training, evolution in RSA performance remained unchanged after intervention in both RSH and RSN (interaction in Table 2).



**Figure 3:** Correlations between changes in tennis performance index (TP) and time to exhaustion (TTE) (A) and between changes in ball accuracy (BA) and TTE (B).

## Discussion

To the best of our knowledge, this is the first study involving well-trained to elite tennis players in hypoxic training. In partial agreement with our initial hypothesis, the main finding of this study is that a 12-day RSH period induced larger benefits in tennis-specific physical/physiological and technical parameters than RSN. Collectively, these findings indicate that RSH is an effective intervention to develop tennis-specific capabilities in well-trained tennis players.

### *Physiological measurements*

In the present study, we found that RSH delayed fatigue during TEST and increased TTE with a two-fold higher improvement compared with RSN. This finding is comparable to some previous RSH studies [13,14]. For instance, Galvin et al. [17] recently showed a 19% additional benefit of RSH compared with RSN in rugby players' high-intensity intermittent running performance (*i.e.*, Yo-Yo intermittent recovery test level 1). Substantially higher performance



improvement was shown as practically relevant since Yo-Yo intermittent recovery tests correlate with physical performance and the amount of high-intensity running in several intermittent sports [17]. RSH also induced a significant increase in TTE during an ergocycle test, whereas no significant change was observed in RSN [26]. Fatigue development was also delayed after RSH during a repeated-cycling sprint test performed until exhaustion [13]. Of interest is that this beneficial effect of RSH on TTE was larger in upper-body exercise (*i.e.*, double-poling sprint training in hypoxia) [14]. Likewise, improved specific test with ball hitting performance is transferable to tennis performance [2]. However, small changes were observed when using continuous incremental test, indirect estimated  $\dot{V}O_{2max}$  and TTE as recently mentioned [7], thereby indicating that sport-specific aerobic field-based protocol may be preferred over laboratory-based continuous protocols due to an increase in ecological validity for performance measurement. For example, Brocherie et al. (2015) reported similar improvement in maximal aerobic velocity for either RSH or RSN groups using a modified version of the University of Montreal track test.

The improvement in time to occurrence of VT2 is larger in RSH compared with RSN. It has been previously demonstrated that cycling power output corresponding to [La] level of 4 mmol.L<sup>-1</sup> improved by +7% during an incremental test after RSH only [34]. This is in line with the enhanced buffer capacity or upregulation of genes involved in pH control previously reported after RSH [13,34]. Potential underlying mechanisms might arise from upregulation of genes previously associated to RSH, as phosphofructokinase, monocarboxylate transporter-1 protein (MCT-1) [34], carbonic anhydrase III or lactate dehydrogenase [13]. This improvement in VT2 is of practical importance since it has been prioritized to be a better marker of submaximal endurance performance than  $\dot{V}O_{2max}$  and since VT2 was correlated with competitive level in male tennis player ( $r = 0.55$ ;  $p = 0.001$ ) [1].

### *Technical performance measurements*

Changes in TP during TEST were mainly caused by the improved BA and cannot be explained by a lack of involvement in ball hitting in favor of lower energy consumption. We did not find significant differences in BV between RSH and RSN from Pre- to Post-test as well as for 100%  $\dot{V}O_{2\max}$ . Moreover, the level of engagement in strokes is also confirmed by the exhaustion criteria (*i.e.*,  $VE_{\max}$ ,  $HR_{\max}$ ,  $[La]_{\max}$ ) that were similar in both groups.

BA significantly increased in RSH, whereas it decreased in RSN. While we cannot rule out a potential learning effect in both groups, it seems that RSH favored some fatigue resistance-related adaptations, potentially transferable to technical performance. However, few investigations conducted on the effects on cognitive skills (*e.g.*, visual search and decision making) in hypoxic condition have demonstrated their effects on attention, perception, executive functioning and short-term memory [30]. While it is accepted that hypoxia adversely affects cognitive function (*i.e.*, reaction time, short-memory, complex attention, executive function and cognitive flexibility), hypoxia acclimatization might influence decision making in a positive way [33]. Can we presume some direct influence of RSH on central nervous system or peripheral resistance to fatigue improvements? On the one hand, during acute hypoxic fatiguing exercise such as RSA, performance decrements could be explained by a reduced neural drive to the musculature, arising secondary to a stronger reflex inhibition due to brain hypoxia [27]. On the other hand, frontal lobe oxygenation has been recently assessed under hypoxic stress and remained unchanged whatever the exercise intensity following regulation of cerebral blood flow during sprint exercise on cycle ergometer [11]. Studies on cerebral oxygenation kinetics during RSH would be of interest to measure this effect over time and to explain why RSH group remained more accurate near exhaustion in tennis-specific patterns.

*No RSH-induced putative changes in  $RSA_{best}$  and  $RSA_{TT}$*

The results observed during RSA tests partly concur with some previous team-sport RSH studies, which found that RSH equally improved RSA performance compared with RSN [6,17,21,32]. In contrast, Brocherie et al. (2017) indicated that meta-analysis' aggregated findings show a greater beneficial effect of RSH vs. RSN for improving mean RSA outcomes. Although the present findings add to the debate [31], they question the type of drills used (more or less specific motor skills) during training and testing sessions, as well as the optimal combination of training variables (*e.g.*, exercise-recovery ratio, session frequency). In addition, we cannot neglect that the present study includes a moderate hypoxic dose while the mean of the RSH studies recently meta-analyzed [7] was  $9.4 \pm 3.1$  RSH sessions including  $1216 \pm 527$  s sprinting duration over a  $27.3 \pm 8.4$  days period.

With the modern tennis game becoming increasingly dynamic and tournament schedules more demanding, the importance of adapted strategy to physical fitness is well accepted [36]. Further adaptations by using upper body during RSH with its positive influence on RSA and muscle blood perfusion [14] appear more suitable than extending the length of protocol. We suppose that this intervention can be programmed 2-3 times per season in order to develop or maintain the athletes' aerobic capacity and BA.

Table 2. RSA performance before (Pre-) and after (Post-) 12 days of repeated-d-sprint training in hypoxia (RSH) vs. normoxia (RSN).

	RSH			RSN			ANOVA main effects (E S)		
	Pre-	Post-	Differences (%)	Pre-	Post-	Differences (%)	Time	Condition	Interaction (Time-Condition)
RSA <sub>Best</sub> (s)	3.30 ± 0.15	3.27 ± 0.12	-1.1 ± 2.2	3.21 ± 0.08	3.17 ± 0.10	-1.3 ± 2.0	0.308 (0.09)	<b>0.018 (0.76)</b>	0.954 (0.08)
RSA <sub>TT</sub> (s)	34.2 ± 1.3	33.8 ± 1.3	-1.1 ± 1.8	33.3 ± 0.9	33.0 ± 0.6	-0.8 ± 1.8	0.349 (0.57)	<b>0.029 (0.23)</b>	0.888 (0.03)
S <sub>Dec</sub> (%)	3.6 ± 1.6	3.5 ± 1.6	0.0 ± 2.7	3.9 ± 2.9	4.4 ± 2.4	0.5 ± 2.1	0.758 (0.51)	0.433 (0.47)	0.714 (0.29)

Values are mean ± SD. Significant differences between Pre- and Post- absolute data (\* p < 0.05, \*\* p < 0.01, \*\*\* p < 0.001) are in bold. Statistical analysis is based on absolute values. Best sprint during RSA (RSA<sub>Best</sub>), Total Time of the 10 sprints (RSA<sub>TT</sub>), Sprint decrement during RSA (S<sub>Dec</sub>), Effect Sizes (ES). Significant results (p < 0.05) are in bold.

### *Limitations and perspectives*

Tennis performance is multifactorial and there are basic performance skills such as the psychological, tactical or strategic capabilities that are even not evaluated. Relating to the extra weight of the portable analyzer and the impact of the mask, it is possible that it may have slightly affected the technical performance, in both training groups, and during Pre- and Post- Tests sessions.

The constitution of both groups by privileging the balance of the levels of play created differences in values in sprints and  $\dot{V}O_{2max}$ , and possible misunderstandings. However we stayed focused on the analysis of the effects of training and their comparison between conditions.

To investigate the mechanisms underlying the RSH-induced improvement in BA, studies on oxygenation (muscle and brain), as done by Curtelin et al. [11] during sprint on cycle ergometer in hypoxia, would be worthwhile. Adding cognitive tests would also be valuable for understanding psychological/cognitive function.

With the methodological constraints encountered when conducting study with “near” elite athletes, it was impossible – due to different individualized schedules (compared with team

sports) – to plan other Post-testing sessions to investigate the delayed effects of RSH as Hamlin et al. did recently [23]; the inclusion of a control group would have been also beneficial to determine its effect.

## **Conclusions**

This study is the first to involve well-trained tennis players in repeated-sprint training in hypoxia compared with similar training in normoxia. With a low hypoxic dose (5 sessions) over a 12-day period, repeated-sprint training in hypoxia improved total time to exhaustion and time to the second ventilatory threshold in a tennis-specific aerobic test. Such innovative training also contributed to improved technical performance, particularly the ball accuracy near exhaustion ( $100\% \dot{V}O_{2\max}$ ). The gains in repeated-sprint ability were of similar extent following both training interventions.

Repeated-sprint training in hypoxia could provide an effective strategy as compared with similar training in normoxia to improve performance and to delay technical impairments near exhaustion in tennis players.

## **Conflicts of interest**

The authors have no conflicts of interest, sources of funding, or financial ties to disclose and no current or past relationship with companies or manufacturers who could benefit from the results of the present study.

## References

1. Baiget E, Fernandez-Fernandez J, Iglesias X, Vallejo L, Rodriguez FA. On-court endurance and performance testing in competitive male tennis players. *J Strength Cond Res* 2014; 28: 256-264
2. Baiget E, Iglesias X, Rodriguez FA. Maximal Aerobic Frequency of Ball Hitting: A New Training Load Parameter in Tennis. *J Strength Cond Res* 2017; 31: 106-114
3. Brechbuhl C, Girard O, Millet GP, Schmitt L. On the Use of a Test to Exhaustion Specific to Tennis (TEST) with Ball Hitting by Elite Players. *PLoS One* 2016; 11: e0152389
4. Brechbuhl C, Girard O, Millet GP, Schmitt L. Technical Alterations during an Incremental Field Test in Elite Male Tennis Players. *Med Sci Sports Exerc* 2017; 49: 1917-1926
5. Brechbuhl C, Millet G, Schmitt L. Accuracy and Reliability of a New Tennis Ball Machine. *J Sports Sci Med* 2016; 15: 263-267
6. Brocherie F, Girard O, Faiss R, Millet GP. High-intensity intermittent training in hypoxia: a double-blinded, placebo-controlled field study in youth football players. *J Strength Cond Res* 2015; 29: 226-237
7. Brocherie F, Girard O, Faiss R, Millet GP. Effects of Repeated-Sprint Training in Hypoxia on Sea-Level Performance: A Meta-Analysis. *Sports Med* 2017; 47: 1651-1660
8. Buchheit M, Mendez-Villanueva A, Delhomel G, Brughelli M, Ahmaidi S. Improving repeated sprint ability in young elite soccer players: repeated shuttle sprints vs. explosive strength training. *J Strength Cond Res* 2010; 24: 2715-2722
9. Buchheit M, Mendez-Villanueva A, Quod M, Quesnel T, Ahmaidi S. Improving acceleration and repeated sprint ability in well-trained adolescent handball players: speed versus sprint interval training. *Int J Sports Physiol Perform* 2010; 5: 152-164

10. Casey DP, Joyner MJ. Compensatory vasodilatation during hypoxic exercise: mechanisms responsible for matching oxygen supply to demand. *J Physiol* 2012; 590: 6321-6326
11. Curtelin D, Morales-Alamo D, Torres-Peralta R, Rasmussen P, Martin-Rincon M, Perez-Valera M, Siebenmann C, Perez-Suarez I, Cherouveim E, Sheel AW, Lundby C, Calbet JA. Cerebral blood flow, frontal lobe oxygenation and intra-arterial blood pressure during sprint exercise in normoxia and severe acute hypoxia in humans. *J Cereb Blood Flow Metab* 2018; 38: 136-150
12. Faiss R, Girard O, Millet GP. Advancing hypoxic training in team sports: from intermittent hypoxic training to repeated sprint training in hypoxia. *Br J Sports Med* 2013; 47 Suppl 1: i45-50
13. Faiss R, Leger B, Vesin JM, Fournier PE, Eggel Y, Deriaz O, Millet GP. Significant molecular and systemic adaptations after repeated sprint training in hypoxia. *PLoS One* 2013; 8: e56522
14. Faiss R, Willis S, Born DP, Sperlich B, Vesin JM, Holmberg HC, Millet GP. Repeated double-poling sprint training in hypoxia by competitive cross-country skiers. *Med Sci Sports Exerc* 2015; 47: 809-817
15. Fernandez-Fernandez J, Ulbricht A, Ferrauti A. Fitness testing of tennis players: how valuable is it? *Br J Sports Med* 2014; 48 Suppl 1: i22-31
16. Fernandez-Fernandez J, Zimek R, Wiewelhove T, Ferrauti A. High-intensity interval training vs. repeated-sprint training in tennis. *J Strength Cond Res* 2012; 26: 53-62
17. Galvin HM, Cooke K, Sumners DP, Mileva KN, Bowtell JL. Repeated sprint training in normobaric hypoxia. *Br J Sports Med* 2013; 47 Suppl 1: i74-79

18. Gatterer H, Philippe M, Menz V, Mosbach F, Faulhaber M, Burtscher M. Shuttle-run sprint training in hypoxia for youth elite soccer players: a pilot study. *J Sports Sci Med* 2014; 13: 731-735
19. Girard O, Brocherie F, Millet GP. Effects of Altitude/Hypoxia on Single- and Multiple-Sprint Performance: A Comprehensive Review. *Sports Med* 2017; 47: 1931-1949
20. Girard O, Mendez-Villanueva A, Bishop D. Repeated-sprint ability - part I: factors contributing to fatigue. *Sports Med* 2011; 41: 673-694
21. Goods PS, Dawson B, Landers GJ, Gore CJ, Peeling P. No Additional Benefit of Repeat-Sprint Training in Hypoxia than in Normoxia on Sea-Level Repeat-Sprint Ability. *J Sports Sci Med* 2015; 14: 681-688
22. Goods PS, Dawson BT, Landers GJ, Gore CJ, Peeling P. Effect of different simulated altitudes on repeat-sprint performance in team-sport athletes. *Int J Sports Physiol Perform* 2014; 9: 857-862
23. Hamlin MJ, Olsen PD, Marshall HC, Lizamore CA, Elliot CA. Hypoxic Repeat Sprint Training Improves Rugby Player's Repeated Sprint but Not Endurance Performance. *Front Physiol* 2017; 8: 24
24. Harriss DJ, Atkinson G. Ethical Standards in Sport and Exercise Science Research: 2016 Update. *Int J Sports Med* 2015; 36: 1121-1124
25. Jones B, Hamilton DK, Cooper CE. Muscle oxygen changes following Sprint Interval Cycling training in elite field hockey players. *PLoS One* 2015; 10: e0120338
26. Kasai N, Mizuno S, Ishimoto S, Sakamoto E, Maruta M, Goto K. Effect of training in hypoxia on repeated sprint performance in female athletes. *Springerplus* 2015; 4: 310
27. Katayama K, Amann M, Pegelow DF, Jacques AJ, Dempsey JA. Effect of arterial oxygenation on quadriceps fatigability during isolated muscle exercise. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 2007; 292: R1279-1286



28. Kovacs MS. Applied physiology of tennis performance. *Br J Sports Med* 2006; 40: 381-385; discussion 386
29. Kovacs MS. Tennis physiology: training the competitive athlete. *Sports Med* 2007; 37: 189-198
30. McMorris T, Hale BJ, Barwood M, Costello J, Corbett J. Effect of acute hypoxia on cognition: A systematic review and meta-regression analysis. *Neurosci Biobehav Rev* 2017; 74: 225-232
31. Millet GP, Brocherie F, Faiss R, Girard O. Clarification on altitude training. *Exp Physiol* 2017; 102: 130-131
32. Montero D, Lundby C. No Improved Performance With Repeated-Sprint Training in Hypoxia Versus Normoxia: A Double-Blind and Crossover Study. *Int J Sports Physiol Perform* 2017; 12: 161-167
33. Niedermeier M, Weisleitner A, Lamm C, Ledochowski L, Fruhauf A, Wille M, Burtcher M, Kopp M. Is decision making in hypoxia affected by pre-acclimatisation? A randomized controlled trial. *Physiology & behavior* 2017; 173: 236-242
34. Puype J, Van Proeyen K, Raymackers JM, Deldicque L, Hespel P. Sprint interval training in hypoxia stimulates glycolytic enzyme activity. *Med Sci Sports Exerc* 2013; 45: 2166-2174
35. Reid M, Morgan S, Whiteside D. Matchplay characteristics of Grand Slam tennis: implications for training and conditioning. *J Sports Sci* 2016; 34: 1791-1798
36. Reid M, Schneiker K. Strength and conditioning in tennis: current research and practice. *J Sci Med Sport* 2008; 11: 248-256
37. Reilly T, Morris T, Whyte G. The specificity of training prescription and physiological assessment: a review. *J Sports Sci* 2009; 27: 575-589

38. Reinhard U, Muller PH, Schmulling RM. Determination of anaerobic threshold by the ventilation equivalent in normal individuals. *Respiration* 1979; 38: 36-42
39. Schimpchen J, Skorski S, Nopp S, Meyer T. Are "classical" tests of repeated-sprint ability in football externally valid? A new approach to determine in-game sprinting behaviour in elite football players. *J Sports Sci* 2016; 34: 519-526
40. Smekal G, Pokan R, von Duvillard SP, Baron R, Tschan H, Bachl N. Comparison of laboratory and "on-court" endurance testing in tennis. *Int J Sports Med* 2000; 21: 242-249
41. Venturelli M, Bishop D, Pettene L. Sprint training in preadolescent soccer players. *Int J Sports Physiol Perform* 2008; 3: 558-562

## **Chapitre 14**

### **Article 9- Physiological and technical differences between junior and professional female tennis players during an incremental field test**

**Article 9- Physiological and technical differences between junior and professional female tennis players during an incremental field test**

Cyril Brechbuhl, Olivier Girard, Grégoire P Millet, Laurent Schmitt. En révision, *Medicine & Science in Sports & Exercise*.

**Abstract:**

**Purpose:** To compare technical and physiological responses between junior and professional female players during an incremental, field test to exhaustion specific to tennis (TEST).

**Methods:** Twenty-seven female players (n = 14 and 13 for juniors and professionals, respectively) completed an incremental field test to exhaustion specific to tennis, which consisted of hitting alternatively forehand and backhand strokes at increasing ball frequency (ball machine) every minute. Ball accuracy and ball velocity were determined by radar and video analysis for each stroke, in addition to cardiorespiratory responses (portable gas analyzer).

**Results:** The stage corresponding to the second ventilatory threshold (+ 20.0%,  $p = 0.027$ ), time to exhaustion (+ 18.9%,  $p = 0.002$ ) and  $\dot{V}O_{2\max}$  (+ 12.4%,  $p = 0.007$ ) were higher in professionals than in juniors. The relative percentage of maximal heart rate was lower at both the first (- 4.7%,  $p = 0.014$ ) and the second (- 1.3%,  $p = 0.018$ ) ventilatory thresholds in professionals. Backhand ball velocity was the only technical parameter that displayed larger (+ 7.1%,  $p = 0.016$ ) values in professionals.

**Conclusion:** Compared to juniors, female professional tennis players possess higher exercise capacity, maximal and submaximal aerobic attributes along with faster backhand stroke velocities during an incremental field test specific to tennis.

**Key words:** Racket sports; Incremental field test; Female athletes; Performance level; Stroke effectiveness.

## Introduction

In response to a three-year International Tennis Federation (ITF) Player Pathway review of professional and junior (between 2001-2013), the Board of directors has recently approved the creation of a new global ITF Transition Tour for 2019 (24). To date, there is a limited understanding of how to prepare female players for a smooth transition into the professional Women's Tennis Association tour (WTA). Hence, access to the top 100 is highly selective with a current mean age of  $25.8 \pm 4.9$  years, whereas the mean age of the top 100 WTA players only was  $22.0 \pm 4.0$  years ten years ago (30). These reports highlight an increasingly complex situation female players face at around 18 years of age during a transition between the end of the Junior tour and the commencement of a sustainable professional career on the WTA circuit. Recent findings from match-play tennis analysis highlight the clear need for gender-specific training and practice designs (27, 32). Beyond obvious differences in stroke production and physical qualities, it is crucial to obtain reference values in female players of different training background for talent identification or to tailor new skill acquisition to the developmental stage of the athlete (20, 31). In an environment that has become increasingly difficult to decrypt, analysis of technical and physiological characteristics under standardized conditions (unlike match play) at the different stages along the career of a female player may help building appropriate technical or physiological training adapted to this category of player.

To evaluate stroke production, rather simple ball accuracy (BA) indices have been used such as the ability to place the ball on a target located in different zones on the tennis court (2, 10, 12, 35, 37). Hence, errors made by a player in relation to all shot performed in a field test (percentage of balls in the zone) is a good predictor of successful groundstrokes performance (10). For instance, *almost perfect* correlations between the national rank position and the ranking of stroke ratings were reported for the Smekal's field test (35). However this analysis was based on 12 males with large national ranking differences [top 30 – over 200]. In the

original version of the Smekal's field test (35) players began hitting balls at a ball frequency (BF) of 12 shots.min<sup>-1</sup>, with subsequent increment stages of 2 shots.min<sup>-1</sup> every 3 minutes, which in turn probably limit the involvement in stroke production and emphasis accuracy. As movement velocity depends on the accuracy requirements of the task, an increased on-court movement velocity (i.e., players under time pressure) would inevitably lead to decreased motor accuracy (20, 31). Interestingly, Rota et al. (34) illustrated a management of the speed-accuracy trade-off in favor of the ball velocity of serve and forehand drives in response to intense intermittent exercise. This implies that stroke production must be determined from simultaneous measurements of BV and BA with increasing fatigue levels. It is currently unclear if female players' strategy would differ according to their training background to prioritize either BA or BV when physically exhausted.

We have recently developed an incremental (by adjusting BF) test to exhaustion specific to tennis (TEST) that consists of hitting alternatively forehands and backhands into target areas (9). TEST simulates some of the components of actual match play (i.e., use of the tennis court dimensions, combination of specific footwork and hitting actions) and uses a reliable ball throwing machine (11), allowing standardized conditions for testing highly skilled players. Previously, we reported that technical alterations (i.e., decrease in BV, BA, and TP) during TEST only occurred at high intensity (>80% of  $\dot{V}O_{2max}$ ) in young (~18 years old), elite male players. To date, the extent to which physiological and technical differences exist, between elite junior and professional categories, under standardized conditions of increased fatigue as encountered during TEST.

The aim of the present study was to compare technical and physiological parameters, for forehand and backhand strokes combined and separately, during TEST completion by elite junior (JUN) and professional (PRO) female tennis players. Although technical alterations were expected above typical competition intensities (i.e., above 80%  $\dot{V}O_{2max}$ ) in both groups, we

tested the following hypotheses: (i) stroke performance (overall BV and BA) and aerobic fitness (sub-maximal and maximal indices) are lower, while (ii) technical alterations would occur earlier (i.e. at a lower relative intensity) in JUN compared to PRO. A second aim was to test the nature of relationships between players' rank order and technical/physical indices.

## **Methods**

### **Ethic Statement**

Both the players and their parents (for minors) provided written informed consent for the study after the procedures and potential risks associated with participation in the study were fully explained. The scientific committee of the French Tennis Federation approved the study that was performed in accordance with the ethical standards reported (23), and conformed to the recommendations of the Declaration of Helsinki.

### **Participants**

Twenty-seven elite competitive female tennis players (mean  $\pm$  SD; age:  $16.7 \pm 3.1$  years; stature:  $169.1 \pm 5.5$  cm; body mass:  $59.7 \pm 5.3$  kg) volunteered to participate in the study. 14 players (age:  $14.7 \pm 1.0$  years; stature:  $168.9 \pm 2.9$  cm; body mass:  $57.7 \pm 5.0$  kg) had an International Tennis Federation (ITF) junior ranking ( $229 \pm 216$ ) [range: 52 – 770], while 13 players (age:  $18.9 \pm 3.2$  years; stature:  $168.9 \pm 7.4$  cm; body mass:  $61.8 \pm 4.9$  kg) were holding a Women Tennis Association (WTA) ( $665 \pm 351$ ) [range: 132 – 1211] ranking. All rankings were established on the day of TEST execution. All participants current are or were members of the national teams of the French Tennis Federation [International Tennis Number (ITN) 1 (elite)]. During the three months before testing (November), they participated regularly to official tennis competitions (i.e. “ITF Juniors”, and “ITF Futures” or WTA tournaments) for a total of 5-10 matches monthly.



## **Players' rank order**

The international tennis ranking (ITF junior and WTA) was used to rank players from 1 to 27 in our population sample following ITF junior and WTA positions.

## **Experimental design**

All participants performed a newly developed incremental test protocol for the first time; the so-called Test to Exhaustion Specific to Tennis (TEST) (6). For all players, TEST was conducted under similar standard environmental conditions (temperature ~ 20°C, relative humidity ~ 50%) on an indoor tennis court (i.e., GreenSet® surface, GreenSet Worldwide S.L., Barcelona, Spain). All participants were given written and verbal instructions to report for testing in a well-rested, well-hydrated and well-nourished state, and to refrain from eating at least two hours before testing. They were told to refrain from strenuous training and to maintain their usual nutritional and hydration habits the day before the test. One week before the main experimental trial, a familiarization session was scheduled allowing TEST requirements to be explained.

## **Experimental procedures**

### **Test to Exhaustion Specific to Tennis (TEST)**

The detailed description of TEST has been published elsewhere (9, 10). Briefly, TEST procedure consists of hitting balls thrown at constant velocity (mean: 86 km.h<sup>-1</sup>; coefficient of variation for ball velocity = 1.7% and 1.5% for right and left corners of the baseline, respectively), alternating forehand and backhand strokes, by a 'Hightof' ball machine. Players had to hit balls cross-court in a prescribed pattern (i.e., topspin drive), while the landing point for thrown balls was set 3 m in front of baseline. Slice strokes were not allowed because of their

potential influence on ball positioning and therefore on TEST performance and associated physiological responses.

After a standardized warm-up (i.e., a 2-min 'habituation' phase where a BF of 16 shots.min<sup>-1</sup> with minimal lateral displacement) and one minute of passive rest (quiet standing), the main test procedure begun: a BF of 10 shots.min<sup>-1</sup> was first selected, which was then increased by 2 shots.min<sup>-1</sup> every minute until the stage corresponding to a BF of 22 shots.min<sup>-1</sup>. From there, increment in BF was set at +1 shots.min<sup>-1</sup> until exhaustion. After each 1-min stage, a 30-s passive recovery break (quiet standing) was implemented.

Players were asked to perform TEST as closely to what they would do during official competitions. They were told to "hit the ball with the best possible velocity/accuracy ratio". Participants had visual of the areas in which they were aiming at. Stroke involvement was motivated by 'live' (immediate) feedback. Based on previous results (32) reporting average of ball velocities in female grand slam at  $106.1 \pm 5.8$  km.h<sup>-1</sup>, BV < 80 km.h<sup>-1</sup> was chosen as the criteria for unsuccessful BV, and BA (50% of balls landing outside the target zone) at the end of each stage completed.

TEST ended with players' voluntary felt exhausted or failed to reach and hit the ball twice in a row or when the players were no longer able to perform strokes with an acceptable execution technique and a demise in BV/BA. Performance was measured as the Time To Exhaustion.

### **Physiological measurements**

Expired air was analyzed continuously (breath-by-breath measurements) for oxygen consumption ( $\dot{V}O_2$ ) using a portable gaz analyser (Metamax II CPX system, Cortex®, Leipzig, Germany). Gas and volume calibration of the measurement device were performed before each test according to manufacturer' instructions. Heart rate (HR) was recorded continuously (Suunto Ambit2®, Vantaa, Finland). Furthermore, 25 µl capillary blood samples were taken

from fingertip and analysed for blood lactate concentrations (LT-1710, Arkray<sup>®</sup>, Japan) at baseline, during TEST (i.e., during the 30-s recovery periods after every stage until a values of 4 mmol.L<sup>-1</sup> was obtained and thereafter every 2 stages) and 15 s after exhaustion.

$\dot{V}O_{2max}$  was determined by the observation of a “plateau” or leveling off in  $\dot{V}O_2$  or when the increase in two successive periods was less than 150 mL.min<sup>-1</sup> (40).  $HR_{max}$  was considered as the highest value reached during the final minute of the test. For final analyses, we only considered values from 60% to 100% of  $\dot{V}O_{2max}$ , with step increases of 5%.

Detection of ventilatory thresholds (VTs) was done by analyzing the points of change in slope (breakdown in linearity) of ventilatory parameters (18, 40). The first ventilatory threshold (VT1) was determined using the criteria of an increase in the ventilatory equivalent for oxygen ( $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ ) with no increase in the ventilatory equivalent for carbon dioxide ( $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ ) and departure from the linearity of  $\dot{V}E$  caused by a more rapid increase in ventilation. VT2 corresponded to an increase in both  $\dot{V}E/\dot{V}O_2$  and  $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ . All VTs assessments were made by visual inspection of graphs of time plotted against each relevant respiratory variable measured during testing. All visual inspections were carried out by two experienced exercise physiologists. The results were then compared and averaged. The difference in the individual determinations of VT2 was < 3%.

The maximal aerobic frequency (MAF) is considered as the last stage maintained with a plateau of  $\dot{V}O_{2max}$ . It differs with maximal work rate and last stage.(4).

### **Evaluation of groundstroke performance**

During TEST, groundstroke production was assessed by the mean of two “primary” variables: BV and BA. BV (km.h<sup>-1</sup>) was measured with a Solstice 2 radar (Hightof<sup>®</sup>, France). BA (%) was defined as the percentage of correct hits in the defined zones (3). For each stage, BV and BA data were averaged ( $BV_{mean}$  and  $BA_{mean}$ , respectively) and expressed for forehands ( $BV_f$

and  $BA_f$ , respectively) and backhands ( $BV_b$  and  $BA_b$ , respectively), separately. Finally, because  $BV$  and  $BA$  in combination better reflect the overall stroke effectiveness in tennis, a Tennis Performance (TP) index was calculated for forehands and backhands separately ( $TP_f$  and  $TP_b$ ) as the product of these two variables.

### **Statistical analysis**

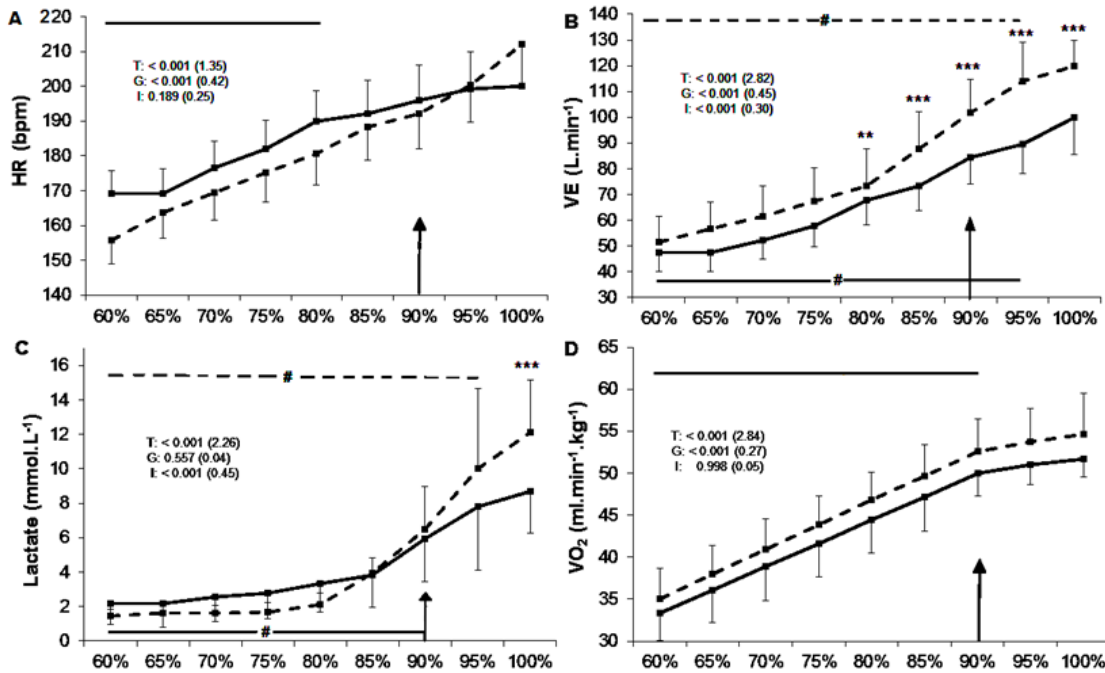
Mean ( $\pm$ SD) was calculated for all variables. Mean difference (in %), and 95% confidence interval (95% CI) were reported when appropriate. A one-way analysis of variance (ANOVA) was used to compare absolute values between JUN and PRO. For each ANOVA, effect size (ES) was calculated (Cohen  $d$ ) with the following criteria: an ES of  $< 0.2$  is classified as a trivial, 0.2 to 0.4 as a small, 0.5 to 0.7 as a moderate and  $> 0.8$  as a large effect.  $BV$ ,  $BA$  and  $TP$  data for each groundstroke (separately and combined) were compared using a two-way repeated measures analysis of variance [Group: (JUN vs. PRO)  $\times$  Time (60%, 65% ... 100% of  $\dot{V}O_{2max}$ )]. However, when the normality test failed, a Mann-Whitney rank sum test was performed at each time interval. Multiple comparisons were made with the Tukey post hoc test. Finally, Pearson rank order correlations were used to test associations (for forehands and backhands separately) of players' ranking with technical and physiological parameters. The following criteria were adopted to interpret the magnitude of  $r$ :  $< 0.1$ , trivial; 0.1-0.3, small; 0.3-0.5, moderate; 0.5-0.7, large; 0.7-0.9, very large; and 0.9-1.0, almost perfect (22). Statistical significance was accepted at  $P < 0.05$ . The statistical analyses were performed using SigmaStat 3.5 software.

## **Results**

### **TEST performance and physiological parameters**

TEST duration was longer (+18.9%, 95% CI: 8-30%;  $p = 0.002$ ) and, at exhaustion,  $\dot{V}O_{2max}$  was also higher (+12.4%; 95% CI: 4-23%,  $p = 0.007$ ) in PRO vs. JUN. %  $HR_{max}$  values at VT1

and VT2 were lower in PRO ( $-4.7\%$ , 95% CI:  $1-8\%$   $p = 0.014$  and  $-1.3\%$ , 95% CI:  $0-2\%$ ,  $p = 0.018$ , respectively), while  $HR_{max}$  didn't differ between groups. Compared to JUN, VE (between 80 and 100% of  $\dot{V}O_{2max}$ ; range  $[8.4-27.5\%]$ ) and  $\dot{V}O_2$  (between 90 and 100% of  $\dot{V}O_{2max}$ ; range  $[5.3-5.8\%]$ ) values were higher in PRO (Figure 1 B and D). HR was higher  $[+2.1-8.6\%]$  between 60 and 90% of  $\dot{V}O_{2max}$  in JUN vs. PRO (Figure 1 A).



**Figure 1:** Changes in heart rate (HR, A); ventilation (VE, B); blood lactate concentration (Lactate, C) and oxygen uptake ( $\dot{V}O_2$ , D) as a function of exercise intensity (% of  $\dot{V}O_{2max}$ ) for professional (dotted line) and junior (continuous line) female players. Vertical arrow indicates the second ventilatory threshold. \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.001$ , significantly different between the two groups. T, G, and I respectively refer to ANOVA main effects of time, condition and interaction between these two factors with p-value and effect size in parentheses. T, C, and I respectively refer to ANOVA main effects of time, condition and interaction between these two factors with P-value and effect size in parentheses. #  $p < 0.05$ , significantly different vs value at 100% of  $\dot{V}O_{2max}$ .

**Table 1.** Physiological variables (**A**) and technical parameters (**B**) during TEST in Junior and Professional female players.

<b>A</b>	<b>Junior</b>	<b>Professional</b>	<b>P value</b>	<b>ES</b>
Stage at VT1	3.1 ± 1.2	3.2 ± 1.0	0.595	0.09
% $\dot{V}O_{2max}$ at VT1	78.8 ± 8.5	73.6 ± 5.3	0.070	<b>-0.73</b>
% HR <sub>max</sub> at VT1	<b>91.6 ± 4.6</b>	<b>87.3 ± 4.2</b>	<b>0.014</b>	<b>-0.97</b>
Stage at VT2	<b>6.0 ± 1.5</b>	<b>7.2 ± 1.2</b>	<b>0.027</b>	<b>0.88</b>
% $\dot{V}O_{2max}$ at VT2	90.1 ± 4.6	90.5 ± 4.6	0.662	0.09
% HR <sub>max</sub> at VT2	<b>97.2 ± 1.0</b>	<b>96.0 ± 1.3</b>	<b>0.018</b>	<b>-1.04</b>
Final Stage	<b>9.4 ± 1.4</b>	<b>10.8 ± 1.4</b>	<b>0.033</b>	<b>1.00</b>
TTE (s)	<b>779 ± 107</b>	<b>926 ± 111</b>	<b>0.002</b>	<b>1.35</b>
MAF (shots.min <sup>-1</sup> )	<b>24.4 ± 1.4</b>	<b>25.8 ± 1.4</b>	<b>0.010</b>	<b>1.00</b>
$\dot{V}O_{2max}$ (mL.min <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> )	<b>51.6 ± 4.2</b>	<b>54.9 ± 3.3</b>	<b>0.049</b>	<b>0.88</b>
$\dot{V}O_{2max}$ (L.min <sup>-1</sup> )	<b>3069 ± 460</b>	<b>3448 ± 361</b>	<b>0.007</b>	<b>0.91</b>
[La <sup>-</sup> <sub>max</sub> ] (mMol.L <sup>-1</sup> )	<b>8.7 ± 2.3</b>	<b>12.1 ± 4.4</b>	<b>0.006</b>	<b>0.98</b>
HR <sub>max</sub> (beats.min <sup>-1</sup> )	197 ± 9	196 ± 6	0.137	-0.13

<b>B</b>	<b>Junior</b>	<b>Professional</b>	<b>P value</b>	<b>ES</b>
BVf (km.h <sup>-1</sup> )	106.6 ± 11.4	111.4 ± 7.6	0.219	0.49
BAf (% in zone)	57.6 ± 12.7	58.2 ± 9.0	0.887	0.05
TPf (a.u)	61.6 ± 15.8	64.2 ± 13.6	0.661	0.18
BVb (km.h <sup>-1</sup> )	<b>102.2 ± 6.7</b>	<b>109.5 ± 7.9</b>	<b>0.016</b>	<b>1.00</b>
BAb (% in zone)	53.1 ± 12.7	60.4 ± 8.5	0.096	0.67
TPb (a.u)	<b>55.0 ± 16.1</b>	<b>66.6 ± 12.6</b>	<b>0.049</b>	<b>0.80</b>
BV <sub>mean</sub> (km.h <sup>-1</sup> )	<b>104.4 ± 8.6</b>	<b>110.4 ± 7.1</b>	0.062	<b>0.76</b>
BA <sub>mean</sub> (% in zone)	55.4 ± 11.5	59.2 ± 7.1	0.310	0.39
TP <sub>mean</sub> (a.u)	58.3 ± 14.9	65.9 ± 11.2	0.153	0.57

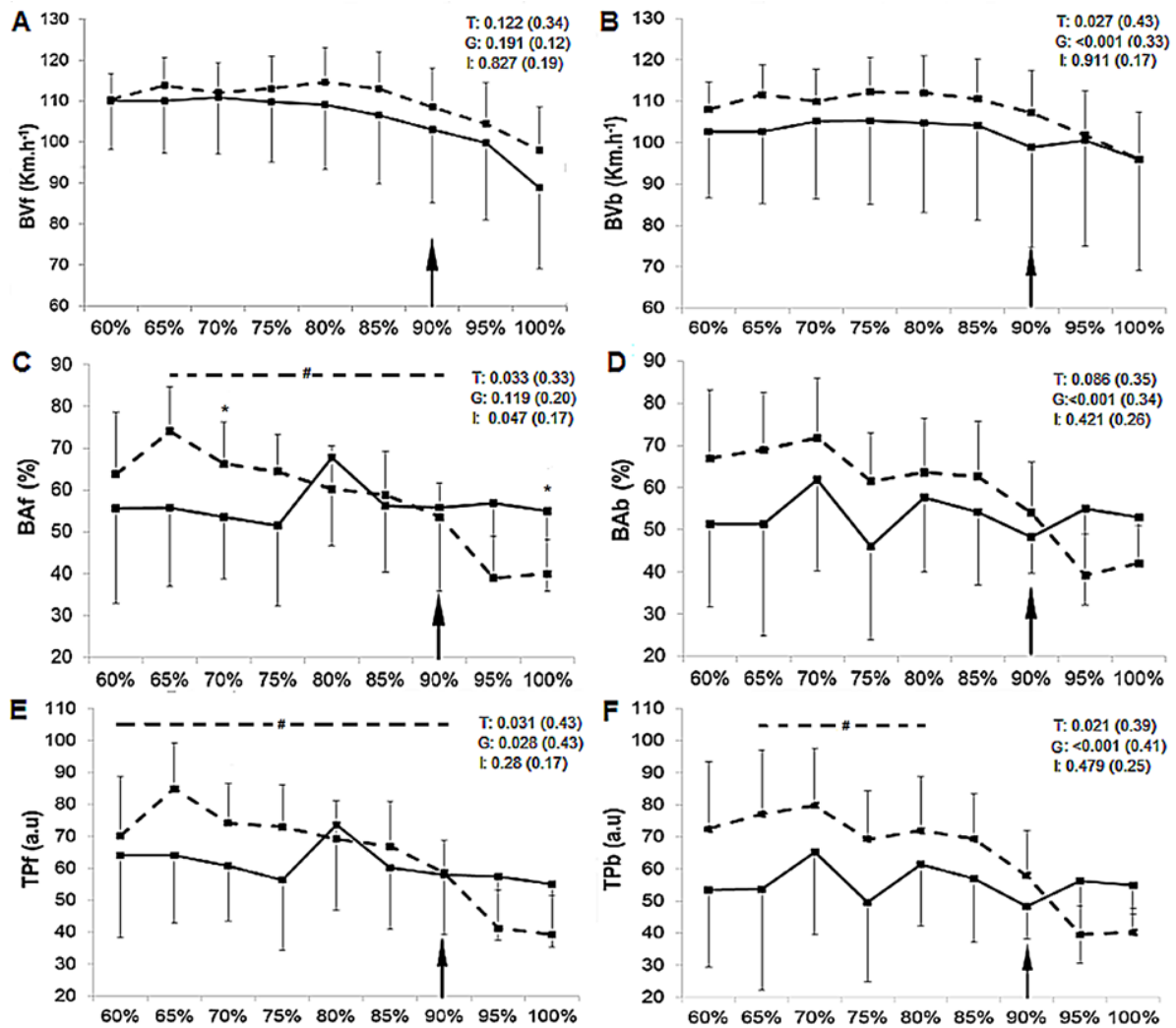
Values are presented as mean ± SD. ES, effect size

VT1, first ventilatory threshold;  $\dot{V}O_{2max}$ , maximum oxygen uptake; HR<sub>max</sub>, maximal heart rate; VT2, second ventilatory threshold; TTE, time to exhaustion; MAF, maximal aerobic frequency; [La<sup>-</sup><sub>max</sub>], maximal blood lactate concentration; BVf, forehand ball velocity; BAf, forehand ball accuracy; TPf, forehand technical performance; BVb, backhand ball velocity; BAb, backhand ball accuracy; TPb, backhand technical performance; BV<sub>mean</sub>, mean ball velocity; BA<sub>mean</sub>, mean ball accuracy; TP<sub>mean</sub>, mean technical performance.

TP is calculated as BA x BV and expressed as arbitrary units (a.u) for both forehands and backhands.

### Groundstroke performance

PRO had significantly higher  $BA_{\text{mean}}$  values at 70% (+19.6%) and 75% (+29.1%) of  $\dot{V}O_{2\text{max}}$ , but reached lower (-27.7%) values at 100% of  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  (Figure 3B). Compared to JUN, TP was higher [+6.1-34.3%] from 60% to 90% of  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  in PRO (Figure 3C). Overall,  $BV_b$  (+7.2%; 95% CI: -3-12%,  $p = 0.016$ ) and  $TP_b$  (+21.1%; 95% CI: 0-42%,  $p = 0.049$ ) were higher in PRO than in JUN, independently of time (Table 1). Compared to JUN,  $BA_f$  (+21.9%; 95% CI: 7-59%,  $p = 0.042$ ) and  $TP_f$  (+21.9%, 95% CI: -3-29%) were higher for PRO at 70% of  $\dot{V}O_{2\text{max}}$ , but lower in  $BA_f$  at 100% of  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  (-37.5%, 95% CI: 5-58%,  $p = 0.016$ ) (Figure. 2 C and E). No significant differences appeared in JUN for both  $TP_{\text{mean}}$  and  $BA_{\text{mean}}$  (Figure 3 B and C). Post hoc also revealed that  $BV_{\text{mean}}$  were significantly higher for JUN when we compared values from 60% to 85% of  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  ( $0.015 \leq p \leq 0.05$ ) vs. 100% of  $\dot{V}O_{2\text{max}}$ , whereas significant differences appeared in PRO from 80% to 90% of  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  ( $0.007 \leq p \leq 0.046$ ) (Figure 3A).



**Figure 2:** Changes in ball velocity in forehand (BV<sub>f</sub>, **A**); ball velocity in backhand (BV<sub>b</sub>, **B**); ball accuracy in forehand (BA<sub>f</sub>, **C**); ball accuracy in backhand (BA<sub>b</sub>, **D**); technical performance in forehand (TP<sub>f</sub>, **E**); technical performance in backhand (TP<sub>b</sub>, **F**), as a function of exercise intensity (% of  $\dot{V}O_{2max}$ ) for the professional (dotted line) and junior (continuous line) female players. Vertical arrow indicates the second ventilatory threshold. \*  $p < 0.05$ , significantly different between the two groups. T, G, and I respectively refer to ANOVA main effects of time, condition and interaction between these two factors with  $p$ -value and effect size in parentheses. #  $p < 0.05$ , significantly different vs value at 100% of  $\dot{V}O_{2max}$ .

### Relationships between variables

Table 2 shows Pearson correlations between players ranking and physiological and technical responses to TEST. There were negative correlations between players' ranking and BV<sub>b</sub> ( $r = -0.485$ ,  $p = 0.01$ ), BA<sub>b</sub> ( $r = -0.455$ ,  $p = 0.017$ ), TP<sub>b</sub> ( $r = -0.465$ ,  $p = 0.015$ ) and BV<sub>mean</sub> ( $r = -0.446$ ;  $p = 0.02$ ) (Table 2).



**Table 2.** Correlation coefficients between players' rank order (both groups combined) and the various physiological (A) and technical (B) parameters.

A	Stage at	% $\dot{V}O_{2max}$	% $HR_{max}$	Stage at	% $\dot{V}O_{2max}$	% $HR_{max}$	TTE	$\dot{V}O_{2max}$	$\dot{V}O_{2max}$	[ $La^-_{max}$ ]
	VT1	at VT1	at VT1	VT2	at VT2	at VT2		( $mL \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ )	( $L \cdot min^{-1}$ )	
<i>r</i> value	-0.29	0.34	0.37	<b>-0.50</b>	-0.13	<b>0.49</b>	<b>-0.58</b>	<b>-0.421</b>	<b>-0.531</b>	-0.27
<i>P</i> value	0.141	0.083	0.061	<b>0.007</b>	0.53	<b>0.009</b>	<b>0.001</b>	<b>0.025</b>	<b>0.003</b>	0.188
B	BVf	BAf	TPf	BVb	BAb	TPb	$BV_{mean}$	$BA_{mean}$	$TP_{mean}$	
	<i>r</i> value	-0.26	-0.11	-0.21	<b>-0.49</b>	<b>-0.46</b>	<b>-0.47</b>	<b>-0.45</b>	-0.31	-0.35
<i>P</i> value	0.191	0.571	0.293	<b>0.01</b>	<b>0.017</b>	<b>0.015</b>	<b>0.02</b>	0.119	0.07	

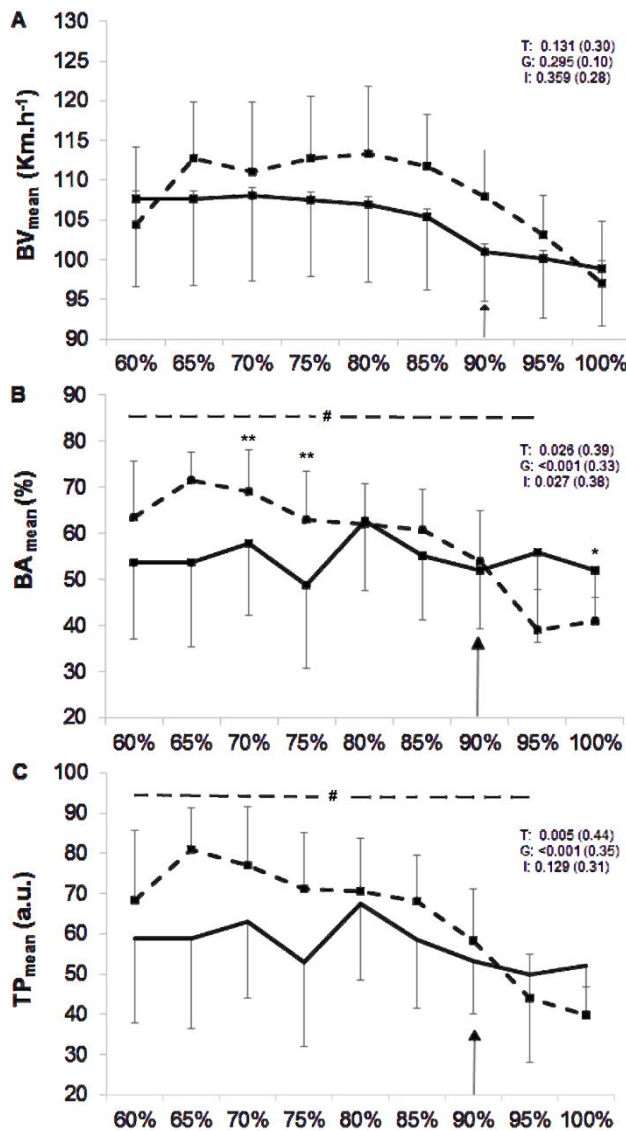
Note that players' rank order corresponded to the ranking held by players on the day of their TEST passation. BVf, forehand ball velocity; BVb, backhand ball velocity; BAf, forehand ball accuracy; BAb, backhand ball accuracy; TPf, forehand technical performance; TPb, backhand technical performance;  $BV_{mean}$ , mean ball velocity;  $BA_{mean}$ , mean ball accuracy;  $TP_{mean}$ , mean technical performance; TTE, time to exhaustion;  $\dot{V}O_{2max}$ , maximum oxygen uptake; [ $La^-_{max}$ ], maximal blood lactate concentration;  $HR_{max}$ , maximal heart rate; VT2, second ventilatory threshold; VT1, first ventilatory threshold.

## Discussion

We compared physiological responses and stroke production (BV, BA, and TP) for forehands and backhands (separately and the two groundstrokes combined) between JUN and PRO female players undergoing TEST along with relationships between players' rank order and these responses. Whereas technical decrement didn't occur earlier in JUN, magnitudes of change were larger in PRO above VT2 intensity. Our novel results are that (i) BVb and TPb are two technical parameters that could discriminate JUN and PRO female players; (ii) PRO displayed higher sub-maximal and maximal aerobic fitness level than their less experienced counterparts. These results confirm only partly our initial hypothesis given that technical performance was not uniformly higher for PRO.

### Technical responses

Interestingly, BA was higher for PRO at 70 and 75% of  $\dot{V}O_{2max}$  (Figure 3B) corresponding nearly to the typical averaged relative  $\dot{V}O_2$  (60-75% of  $\dot{V}O_{2max}$ ) (18, 25) and blood lactate concentration ( $\sim 2 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ ) (16) values reported for tennis competitions.



**Figure 3:** Changes in ball velocity (BV<sub>mean</sub>, A), ball accuracy (BA<sub>mean</sub>, B), and technical performance (TP<sub>mean</sub>, C) for forehand and backhand stroked combined as a function of exercise intensity (% of  $\dot{V}O_{2max}$ ) for professional (dotted line) and junior (continuous line) female players. Vertical arrow indicates the second ventilatory threshold. \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , significantly different between the two groups (at specific exercise intensities). T, G, and I respectively refer to ANOVA main effects of time, group and interaction between these two factors with p-value and effect size in parentheses. #  $p < 0.05$ , significantly different vs value at 100% of  $\dot{V}O_{2max}$ .

Previous field test studies have assessed the effect of fatigue on technical skill performance and highlighted that BA is of paramount importance (10, 12, 28, 37). Recent study reported that international male players were able to maintain significantly higher levels of BA (11% greater on average) through high exercise intensities, and the stepwise discriminant analyses suggest that the ability to maintain high levels of BA at high intensities may also be a factor that differentiates players of international and national level. (3). Reportedly, BA explained 37% of variability in competitive performance ( $r = 0.61$ ;  $p = 0.001$ ) as well as 53% and 55% in combination to  $\dot{V}O_{2max}$  and VT2 values, respectively (2). Almost perfect correlations ( $r = 0.94$ ,  $P < 0.001$ ) have also been reported between stroke ratings (as a surrogate of BA) and players'

ranking (34). The difference in  $BA_{\text{mean}}$  in our study [55-60%] in reference to the study by Baiget et al. (2) ( $66 \pm 9\%$ ) could possibly be explained by ball machine throwing velocity ( $86.5 \pm 1.3 \text{ km.h}^{-1}$  vs.  $68.6 \pm 1.9 \text{ km.h}^{-1}$ ). These authors also reported differences in the “SET-Test” when they confronted elite ( $70 \pm 6\%$ ) and subelite ( $63 \pm 9\%$ ) male tennis players (3), using the “target field” originally designed by Smekal et al. (35). When evaluating the reliability of stroke precision during the “on-court endurance testing for tennis”, they found lower values in  $BA_{\text{mean}}$  ( $40.9 \pm 11.7\%$ ) (35). No female data with similar field test designs are available. In our study, the increase in the number of missed strokes could be related to poor timing or an inability of players to position themselves properly for efficient stroke hitting (i.e. being “late”). In support, a decrement in maximal running speed likely occurs as players become fatigued, resulting in suboptimal stroke preparation (e.g., footwork and balance) and ultimately in a slowing of BV (19). Additional biomechanical analysis of stroke production combining 3-D motion (segment positioning), electromyography (muscle activation) and pedobarography (plantar loading) analysis would help to explain the reasons for such suboptimal ball placement as fatigue develops. This seems particularly relevant in the context of tennis where important inter-individual differences exist regarding effective groundstroke production (21, 33), which could be exacerbated under fatigue.

While BV in PRO was on average higher than in JUN throughout TEST (Table 1), significantly higher values were only reported for BVb (Table 1). This between-group difference in BVb is an important observation that would contribute to partly explain the higher performance level in WTA- compared to ITF-ranked players. Recent advances in tracking technologies have made feasible to compare shots characteristics of JUN and PRO, in particular with more objective analysis during actual tennis competition. A recent study provided a comprehensive comparative analysis of JUN and PRO match play between 2000 and 2015 (27). Forehand and backhand speeds achieved during competitions were comparable in women PRO and JUN

(Forehands: 111 vs. 110 km.h<sup>-1</sup>; Backhands: 106 vs. 103 km.h<sup>-1</sup>, respectively) (27). It seems difficult to conclude on skills comparison between different categories of players during actual competition as the opponent level and emotional influences likely play a crucial role. For these reasons, we believe that standardized conditions as encountered during TEST are more appropriate when comparing players of various standard.

### **Physiological responses**

The load increments for PRO and JUN during TEST were relatively similar as evidenced by the progressive increases in  $\dot{V}O_2$ , VE, and HR (figure 1) responses.  $\dot{V}O_2$  and VE curves for PRO were globally higher compared to their less experienced counterparts. It is known that there is coordination (“entrainment”) between limb (and especially upper limbs) movements and breathing (15). Active breathing is probably increased in PRO due to moderate effect in  $BV_{\text{mean}}$  ( $110.4 \pm 7.1$  vs  $104.4 \pm 8.6$  km.h<sup>-1</sup>, ES = 0.76).

PRO possessed higher aerobic fitness ( $\dot{V}O_{2\text{max}}$ , % HR<sub>max</sub> at VTs, and stage number reached at VT2) (Table 1). Our  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  values are higher than those reported by Ferrauti (19) with national level ( $49.0 \pm 3.9$  mL.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup> for adult (n = 13) and  $47.3 \pm 4.6$  mL.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup> for under 16 female players (n = 14)) during a specific test without ball hitting. To our knowledge, no  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  data are available that have assessed female players practicing a specific test to exhaustion. Bergeron et al. (7) previously indicated that players with a well-developed  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  would better sustain cardiovascular load and improve their recovery between points. In support, a strong inverse relationship between  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  and ATP entry ranking over time in a professional tennis player has been reported (6). Previous findings also postulated that for a top female player, it is important that  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  is above 50 mL.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup> but that higher  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  values (> 65 mL.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>) would not further improve on-court performance against a  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  of ~ 55–60 mL.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup> (25, 26). This is reflected here where PRO displayed averaged  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  values of  $54.9 \pm$

3.3 mL.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>. However the moderate correlation of competitive ranking with  $\dot{V}O_{2max}$  (L.min<sup>-1</sup>) ( $r = 0.53$ ) underlines the pervasiveness of aerobic capacities without solely reflect a tennis level. This is because performance in tennis is largely dependent on the technical, explosive sequence, tactical and motor control/coordination aspects.

PRO had smaller % of  $HR_{max}$  values than JUN at VTs (VT1: 87.3%  $\pm$  4.2% vs. 91.6%  $\pm$  4.6%; VT2: 96.0%  $\pm$  1.3% vs. 97.2%  $\pm$  1.0%). Surprisingly, only limited data are available regarding VTs values in tennis players. Our aforementioned HR data are slightly higher than those generally reported in different categories of players (more often male than female, from regional to international level) undertaking a tennis specific field test ([79-87% of  $HR_{max}$ ] at VT1 (2, 22), [85-95% of  $HR_{max}$ ] at VT2 intensities (2, 9, 10, 22, 35)). According to König et al (25), high VTs values could reflect the ability to tolerate high exercise intensity during tennis competitions. Low-to-moderate correlations were found elsewhere between VTs and players' competitive level ( $r = 0.35$ ,  $p = 0.038$  and  $r = 0.55$ ,  $p = 0.001$  for VT1 and VT2 respectively) (2). The discrepancies between our results and these studies are mainly the result of the training status of the tested players. Nevertheless, comparing results between studies is only anecdotal since subject characteristics, equipment, protocols, and test modes as well as the methods used to detect ventilatory breakpoints differ between studies. HR is affected by factors as emotional stress, dehydration, and illness can all cause changes in HR without associated changes in  $\dot{V}O_2$  (13). Beyond physiological capabilities, an adapted HR is probably due to their 'expertise'.

PRO showed significantly higher stage at VT2 and MAF. Differences can essentially be explained by physiological capacities because  $TP_{mean}$  is also higher in PRO until 90% of  $\dot{V}O_{2max}$ . Consequently it is unlikely that the higher stages reached can be explained by a lesser engagement in stroke production (cf. Figure 3A). The elevated aerobic fitness of PRO would be explained by the need of higher aerobic condition to deal with the intensity of high-level competition. Similar findings have already been reported when International and National male

players were compared on the SET-Test (3). In this later study, an important finding was that international players showed better aerobic fitness (on average,  $\dot{V}O_{2max}$  and VT2 were 8% and 10% greater, respectively) and better performance during the specific field test as compared with their national-level counterparts. Baiget et al. (2) indicated that large part of the variability in the 38 competitive players that they have tested on a specific incremental test could be explained by time to exhaustion and physiological parameters (VT2 and maximal load). Although most of the important actions during the short-term periods of activity (i.e., strokes, accelerations or changes of direction) depend fundamentally on the anaerobic metabolism (intramuscular phosphates and glycolysis), the aerobic metabolism (oxidative phosphorylation) allows resynthesizing the high-energy phosphates during recovery periods (17, 36). Adequate aerobic fitness promotes better physiological regeneration between points, matches and tournaments to maintain a high competitive level throughout the season (5). Our significant small to moderate correlation between the ranking level and  $\dot{V}O_{2max}$  ( $r = -0.421$ ), and stage at VT2 ( $r = -0.50$ ) also confirm precedent findings mostly derived from male players (2, 9).

Of interest is also that [La-] increase above 90% of  $\dot{V}O_{2max}$  was higher in PRO corresponding to lower  $TP_{mean}$  than JUN at 100%  $\dot{V}O_{2max}$  (Figure 1C). BA and TP indices also became further altered compared to JUN (Figure 2). This difference between our two groups of players above 90% of  $\dot{V}O_{2max}$  is probably due to a permanent physical engagement in the strokes within professionals, suggesting increased involvement of anaerobic glycolytic processes to supply energy (36). In support, an inverse correlation ( $r = -0.51$ ,  $p = 0.008$ ) has been observed between changes in  $TP_{mean}$  and blood lactate concentration from 60% to 100% of  $\dot{V}O_{2max}$ . Even if our PRO athlete are probably not as aerobically-trained as long distance runners, VTs values (cf. table 1) observed in our players corresponded to values that are typically measured in high-level endurance athletes (8). In a study where match-like conditions were reproduced in PRO tennis players, blood lactate values as high as  $8.6 \text{ mmol.L}^{-1}$  have been reported (29). This

suggests a substantial participation of glycolytic processes to meet the energy supply and to perform high technical skills when game accelerates. Dramatic technical performance reductions are commonly observed when tennis players near or reach volitional exhaustion (blood lactate concentration = 9.6 mmol.L<sup>-1</sup>) (12). Whatever the exact physiological mechanisms, we hypothesized that peripheral disturbances partly caused deterioration in BV and BA at high intensities and explain the result in TP at 100% of  $\dot{V}O_{2max}$ .

### **Practical applications**

This study provides evidence that, when designing a training program for elite junior female tennis players, improvement of their aerobic capacity should represent a priority. Some of the largest differences between junior and professional are seen in the physical demands imposed on players during game play (27). To develop efficient groundstrokes (optimal speed and accuracy combined with high MAF), the usefulness of polarized training has recently been promoted (10). Although tennis performance analysis underlines the close relationship between physical and technical parameters, scientific or coaching approaches often neglect to concurrently develop these two aspects during the same training session. We therefore propose that high-intensity situations encountered during TEST (above 90%  $HR_{max}$ ) could be used by coaches in the programming of an overload training stimulus during tennis practice of female players (18). For instance, when targeting improvement in technical skills, we recommend to train at low intensities, in zone 1 ( $\dot{V}O_2$  at or below VT1) (14), corresponding to BA from 50% to ~70% and BV from 105 to ~115 km.h<sup>-1</sup>, depending on the level of practice. Time in zone 1 brings physiological benefits and will indirectly lead to improved capacity to cope with the higher intensity of competitive tennis (zone 3:  $\dot{V}O_2$  at or above VT2) corresponding to the “money time”, in a small playing time (3% ± 5%) (1).

Implementing TEST as a profiling tool seems meaningful when including both physiological and technical analysis, allowing possible comparison with data henceforth available. Based on observed difference in MAF,  $\dot{V}O_{2max}$ ,  $BA_b$  and  $TP_b$  we propose that TEST can be used as a discriminating tool in order to evaluate the potential of a young female player to eventually reach the professional level.

### **Strengths and limitations-perspectives.**

Although all efforts have been made to make TEST as specific as possible to the game of tennis, it is also acknowledged that simulated tennis practice does not completely reflect the actual competition situation (lack of visual cues, lower uncertainties, and anticipation). We cannot minor that tennis performance is multifactorial and there are basic performance skills such as the psychological, tactical or strategic capabilities that could not be incorporated in our comparison of training backgrounds.

Although our study highlights the potential of TEST, that uses backhand and forehand strokes, as an evaluation and / or selection test for the higher level, the serve lacks an overall analysis. Hence, producing faster BV (+10 km.h<sup>-1</sup>) for the first serve in particular or maintaining BA under fatigue have proven necessary skills for an efficient transition to professional level (27). While we have recruited top-level women players (including some of the best representative players for France), we cannot rule out that larger differences would have been noted if players with higher ITF junior and WTA rankings were included.

### **Conclusion**

By using TEST that offers the possibility to concurrently evaluate differences in technical and physiological parameters our novel findings indicate that professional compared to less experienced (juniors) players possess higher aerobic fitness level and more proficient technical



performance for the backhand stroke. Professional players have lower %  $HR_{max}$  values combined to their technical skills. In order to reach the professional level in female players, it is therefore crucial that physical conditioners working with elite juniors put strong emphasis to further develop aerobic fitness of their players. Reinforcing the backhand technique and the muscular power involved in this stroke, notably in the context of fatigue development, also appears as a priority.

### **Disclosures**

The authors have no conflicts of interest, source of funding, or financial ties to disclose and no current or past relationship with companies or manufacturers who could benefit from the results of the present study.

The results of the study are presented clearly, honestly, and without fabrication, falsification, or inappropriate data manipulation.

## References

1. Baiget E, Fernandez-Fernandez J, Iglesias X, and Rodriguez FA. Tennis Play Intensity Distribution and Relation with Aerobic Fitness in Competitive Players. *PLoS One* 10: e0131304, 2015.
2. Baiget E, Fernandez-Fernandez J, Iglesias X, Vallejo L, and Rodriguez FA. On-court endurance and performance testing in competitive male tennis players. *J Strength Cond Res* 28: 256-264, 2014.
3. Baiget E, Iglesias X, and Rodriguez FA. Aerobic Fitness and Technical Efficiency at High Intensity Discriminate between Elite and Subelite Tennis Players. *Int J Sports Med* 37: 848-854, 2016.
4. Baiget E, Iglesias X, and Rodriguez FA. Maximal Aerobic Frequency of Ball Hitting: A New Training Load Parameter in Tennis. *J Strength Cond Res* 31: 106-114, 2017.
5. Banzer W, Thiel C, Rosenhagen A, and Vogt L. Tennis ranking related to exercise capacity. *Br J Sports Med* 42: 152-154; discussion 154, 2008.
6. Banzer W, Thiel C, Rosenhagen A, and Vogt L. Tennis ranking related to exercise capacity. *BMJ Case Rep* 2009, 2009.
7. Bergeron MF, Maresh CM, Kraemer WJ, Abraham A, Conroy B, and Gabaree C. Tennis: a physiological profile during match play. *Int J Sports Med* 12: 474-479, 1991.
8. Billat LV. Use of blood lactate measurements for prediction of exercise performance and for control of training. Recommendations for long-distance running. *Sports Med* 22: 157-175, 1996.
9. Brechbuhl C, Girard O, Millet GP, and Schmitt L. On the Use of a Test to Exhaustion Specific to Tennis (TEST) with Ball Hitting by Elite Players. *PLoS One* 11: e0152389, 2016.

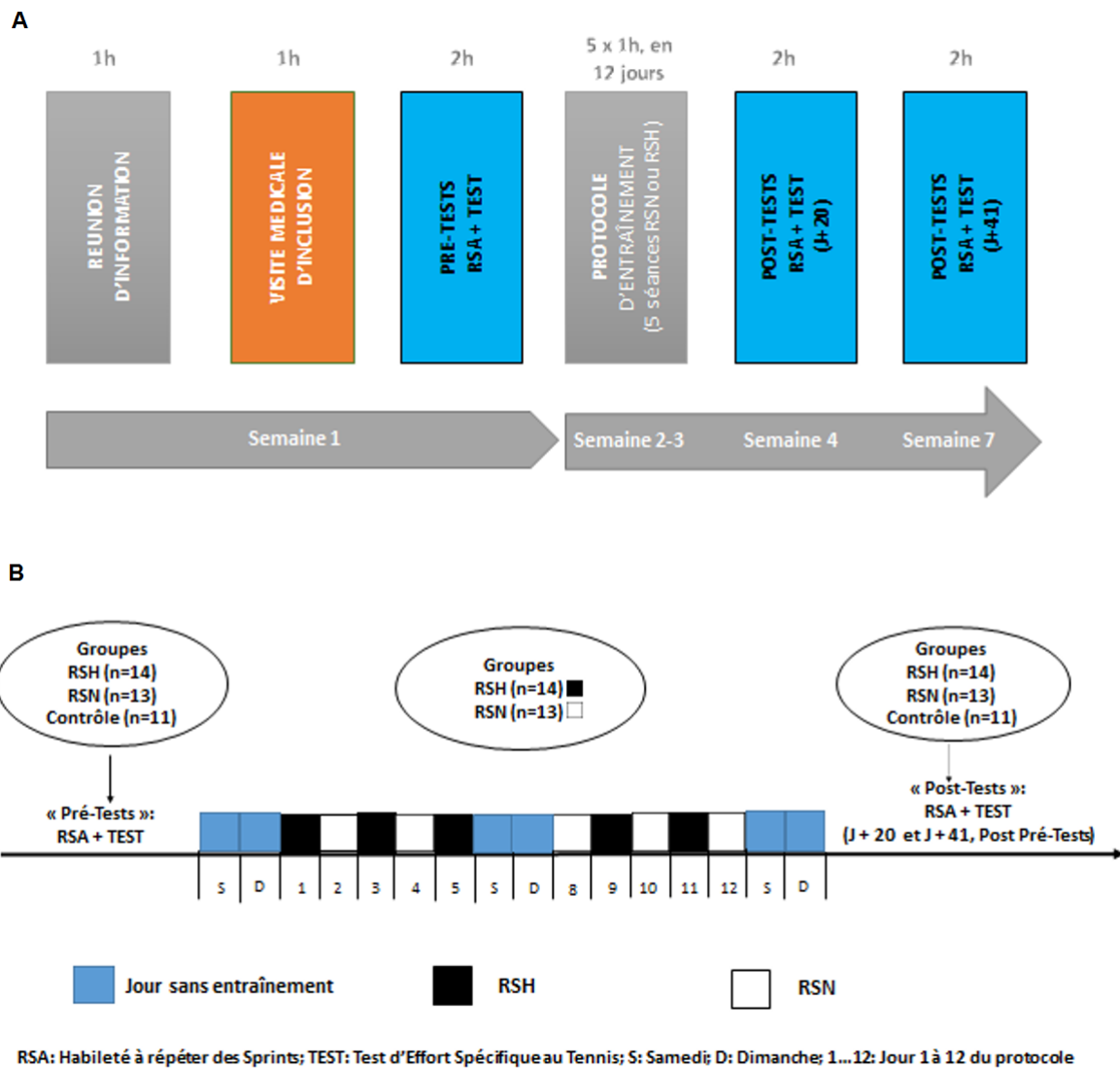
10. Brechbuhl C, Girard O, Millet GP, and Schmitt L. Technical Alterations during an Incremental Field Test in Elite Male Tennis Players. *Med Sci Sports Exerc* 49: 1917-1926, 2017.
11. Brechbuhl C, Millet G, and Schmitt L. Accuracy and Reliability of a New Tennis Ball Machine. *J Sports Sci Med* 15: 263-267, 2016.
12. Davey PR, Thorpe RD, and Williams C. Fatigue decreases skilled tennis performance. *J Sports Sci* 20: 311-318, 2002.
13. Davidson L, McNeill G, Haggarty P, Smith JS, and Franklin MF. Free-living energy expenditure of adult men assessed by continuous heart-rate monitoring and doubly-labelled water. *Br J Nutr* 78: 695-708, 1997.
14. Esteve-Lanao J, San Juan AF, Earnest CP, Foster C, and Lucia A. How do endurance runners actually train? Relationship with competition performance. *Med Sci Sports Exerc* 37: 496-504, 2005.
15. Fabre N, Perrey S, Arbez L, and Rouillon JD. Neuro-mechanical and chemical influences on locomotor respiratory coupling in humans. *Respir Physiol Neurobiol* 155: 128-136, 2007.
16. Fernandez-Fernandez J, Mendez-Villanueva A, Fernandez-Garcia B, and Terrados N. Match activity and physiological responses during a junior female singles tennis tournament. *Br J Sports Med* 41: 711-716, 2007.
17. Fernandez-Fernandez J, Sanz-Rivas, D., & Mendez-Villanueva, A. A Review of the Activity Profile and Physiological Demands of Tennis Match Play. *Strength and conditioning research* 31: 15-26, 2009.
18. Fernandez J, Mendez-Villanueva A, and Pluim BM. Intensity of tennis match play. *Br J Sports Med* 40: 387-391; discussion 391, 2006.

19. Ferrauti A, Kinner V, and Fernandez-Fernandez J. The Hit & Turn Tennis Test: an acoustically controlled endurance test for tennis players. *J Sports Sci* 29: 485-494, 2011.
20. Ferrauti A, Pluim BM, and Weber K. The effect of recovery duration on running speed and stroke quality during intermittent training drills in elite tennis players. *J Sports Sci* 19: 235-242, 2001.
21. Genevois C, Reid M, Rogowski I, and Crespo M. Performance factors related to the different tennis backhand groundstrokes: a review. *J Sports Sci Med* 14: 194-202, 2015.
22. Girard O, Chevalier R, Leveque F, Micallef JP, and Millet GP. Specific incremental field test for aerobic fitness in tennis. *Br J Sports Med* 40: 791-796, 2006.
23. Harriss DJ, Macsween A, and Atkinson G. Standards for Ethics in Sport and Exercise Science Research: 2018 Update. *Int J Sports Med* 38: 1126-1131, 2017.
24. ITF. ITF Pro Circuit Review. Stage One: Data analysis (Décembre 2014). ITF Tennis Website: International Tennis Federation, 2014.
25. Konig D, Huonker M, Schmid A, Halle M, Berg A, and Keul J. Cardiovascular, metabolic, and hormonal parameters in professional tennis players. *Med Sci Sports Exerc* 33: 654-658, 2001.
26. Kovacs MS. Tennis physiology: training the competitive athlete. *Sports Med* 37: 189-198, 2007.
27. Kovalchik SA and Reid M. Comparing Matchplay Characteristics and Physical Demands of Junior and Professional Tennis Athletes in the Era of Big Data. *J Sports Sci Med* 16: 489-497, 2017.
28. Lyons M, Al-Nakeeb Y, Hankey J, and Nevill A. The effect of moderate and high-intensity fatigue on groundstroke accuracy in expert and non-expert tennis players. *J Sports Sci Med* 12: 298-308, 2013.

29. Mendez-Villanueva A, Fernandez-Fernandez J, Bishop D, Fernandez-Garcia B, and Terrados N. Activity patterns, blood lactate concentrations and ratings of perceived exertion during a professional singles tennis tournament. *Br J Sports Med* 41: 296-300; discussion 300, 2007.
30. Reid M, Crespo M, and Santilli L. Importance of the ITF Junior Girls' Circuit in the development of women professional tennis players. *J Sports Sci* 27: 1443-1448, 2009.
31. Reid M, Duffield R, Dawson B, Baker J, and Crespo M. Quantification of the physiological and performance characteristics of on-court tennis drills. *Br J Sports Med* 42: 146-151; discussion 151, 2008.
32. Reid M, Morgan S, and Whiteside D. Matchplay characteristics of Grand Slam tennis: implications for training and conditioning. *J Sports Sci* 34: 1791-1798, 2016.
33. Rota S, Hautier C, Creveaux T, Champely S, Guillot A, and Rogowski I. Relationship between muscle coordination and forehand drive velocity in tennis. *J Electromyogr Kinesiol* 22: 294-300, 2012.
34. Rota S, Morel B, Saboul D, Rogowski I, and Hautier C. Influence of fatigue on upper limb muscle activity and performance in tennis. *J Electromyogr Kinesiol* 24: 90-97, 2014.
35. Smekal G, Pokan R, von Duvillard SP, Baron R, Tschan H, and Bachl N. Comparison of laboratory and "on-court" endurance testing in tennis. *Int J Sports Med* 21: 242-249, 2000.
36. Smekal G, von Duvillard SP, Rihacek C, Pokan R, Hofmann P, Baron R, Tschan H, and Bachl N. A physiological profile of tennis match play. *Med Sci Sports Exerc* 33: 999-1005, 2001.
37. Vergauwen L, Spaepen AJ, Lefevre J, and Hespel P. Evaluation of stroke performance in tennis. *Med Sci Sports Exerc* 30: 1281-1288, 199

# **Chapitre 15**

## **Annexes**



**Figure 19.** déroulement du protocole expérimental (A). Protocole d'entraînement de 12 jours (B).

# CPP - Ile-de-France VI

## Groupe Hospitalier Pitié-Salpêtrière

**Président :** Nathalie BRION

**Vice-Président :** Christophe DEMONFAUCON

Kevin BIHAN - Laurent CAPELLE - Micheline DENANCE - Jacqueline DUNO - Marie-Hélène FIEVET - Marie GICQUEL-BENADE - Clarisse GOUDIN - Gilles HUBERFELD - Nathalie JOUNIAUX-DELBEZ - Annie LE FRANC - Christiane LOOTENS - Marie-Cécile MASURE - Michèle MEUNIER-ROTIVAL - Marie-Caroline MEYOHAS - Anne-Laure MORIN - Thang NGUYEN - Sabine PLANCOULAINE - Florence RABILLON - Benoît ROUSSEAU - Marie-Pascale SCHULLER - Sophie TEZENAS DU MONTCEL - Martyna TOMCZYK - Dominique VARIN

Paris, le 1<sup>er</sup> février 2018

Monsieur le Docteur B. MONTALVAN  
Fédération Française de Tennis  
4 Place de la porte Molitor  
75016 Paris

**Référence à rappeler :** CPP/ 77-17  
**ID RCB :** 2017-A02865-48

Monsieur,

Je vous prie de bien vouloir trouver ci-joint l'avis favorable de votre protocole intitulé :

*« Effets de la méthode de répétition de sprints en hypoxie chez des joueurs de tennis bien entraînés »*

Je vous prie d'agréer, Monsieur, mes salutations distinguées.



Le Président du CPP,  
Professeur Nathalie BRION



## CPP - Ile-de-France VI Groupe Hospitalier Pitié-Salpêtrière

---

Projet de recherche enregistré  
Sous le n° 77-17  
ID RCB : 2017-A02865-48

A Paris, le 1<sup>er</sup> février 2018

Le comité a été saisi le : 24 octobre 2017

d'une demande d'avis pour le projet de recherche intitulé :  
« Effets de la méthode de répétition de sprints en hypoxie chez des joueurs de tennis bien entraînés »

- . Protocole du 22/1/18
- . Note d'information et formulaire de consentement du 22/1/18
- . Liste des investigateurs du 22/1/18

dont le promoteur est : Fédération Française de Tennis

dont le coordinateur est : Docteur B. MONTALVAN

Le comité a examiné les informations relatives à ce projet lors de sa séance du :

**31 janvier 2018**

Ont participé à la délibération :

Kevin BIHAN - Pharmacien hospitalier (S)  
Nathalie BRION - Thérapeute (T)  
Laurent CAPELLE - Neurochirurgien (T)  
Christophe DEMONFAUCON - Représentant des associations agréées de malades (T)  
Micheline DENANCE - Représentante des associations agréées d'usagers du système de santé (S)  
Jacqueline DUNO - Qualifiée en matière juridique (S)  
Marie-Hélène FIEVET - Pharmacien hospitalier (T)  
Marie GICQUEL-BENADE - Travailleur social (T)  
Clarisse GOUDIN - Qualifiée en matière juridique (S)  
Nathalie JOUNIAUX-DELBEZ - Psychologue hospitalier (S)  
Annie LE FRANC - Représentante des associations agréées de malades (T)  
Christiane LOOTENS - Représentante des associations agréées de malades (S)  
Marie-Cécile MASURE - Psychologue hospitalier (T)  
Thang NGUYEN - Médecin généraliste (T)  
Marie-Pascale SCHULLER - Pneumologue (S)  
Sophie TEZENAS DU MONTCEL - Biostatisticien (T)  
Dominique VARIN - Médecin généraliste (S)

**LE COMITE A ADOPTE LA DELIBERATION SUIVANTE : AVIS FAVORABLE**

**Motivation : Le comité a estimé que le rapport bénéfice/risque est acceptable pour les sujets participant à la recherche.**

*. Conformément à l'article R. 1123-26 du code de la santé publique, le présent avis devient caduque si la recherche n'a pas débuté dans un délai de deux ans.*



Le Président du CPP  
Professeur Nathalie BRION

---

CPP IDF VI 47, Boulevard de l'Hôpital 75013 PARIS  
Tél: 01 42 161683 Fax: 01 42 162715



## Dans le cadre d'un protocole de recherche, la FFT recrute



Ce protocole a pour objectif d'étudier les effets de la méthode de répétition de sprints en hypoxie chez des joueurs de tennis bien entraînés. Dans ce cadre, la Fédération Française de Tennis est à la recherche de joueurs de tennis

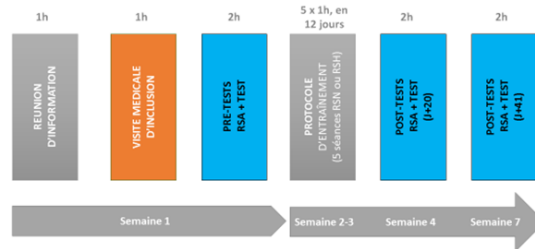


- Etre un homme ou une femme âgé de 18 à 40 ans
- Pouvoir se rendre au Centre National d'Entraînement (4 Place de la Porte Molitor, 75016 Paris) de la FFT (3 sessions de tests (2h) et 5 sessions d'entraînement d'une heure)
- Etre licencié FFT et classé au minimum 15
- Ne pas souffrir de pathologie cardiovasculaire
- Ne pas présenter d'antécédents relatifs au mal des montagnes

- A la fin du protocole, chaque participant recevra :
- 200€ d'indemnisation + défraiement kilométrique
  - Bilan et débriefing des tests réalisés

Le protocole se déroulera du 12/02 au 31/03/2018 inclus

### Déroulement du protocole



RSA: Habileté à répéter des Sprints; TEST: Test d'Effort Spécifique au Tennis; RSN: Répétition de sprint en normoxie; RSH: Répétition de sprints en hypoxie.

Informations & inscriptions auprès de : [cyril.brechbuhl@fft.fr](mailto:cyril.brechbuhl@fft.fr) - 0675001646

Figure 20. Fiche de recrutement de l'étude RSHTEN



## Organise un protocole intitulé « Effets de la méthode de répétition de sprints en hypoxie chez des joueurs de tennis »

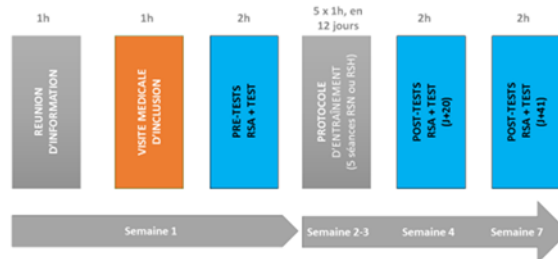


Le but de cette étude : Evaluer l'impact et l'efficacité de la méthode RSH avec frappes de balles intégrées sur le flux sanguin et ses potentielles corrélations avec une meilleure capacité de performance dans l'activité spécifique. La mesure de cette capacité à mieux faire face à la difficulté de l'effort sera évaluée à travers le Test d'Effort Spécifique au Tennis. Le flux sanguin sera mesuré lors du test d'habileté à répéter des sprints, ainsi que la variabilité cardiaque.



Le protocole se déroulera du 12/02 au 31/03/2018 inclus

### Déroulement du protocole



RSA: Habileté à répéter des Sprints; TEST: Test d'Effort Spécifique au Tennis; RSN: Répétition de sprint en normoxie; RSH: Répétition de sprints en hypoxie.

Investigateur principal et coordonnateur : Bernard Montalvan et Cyril Brechbuhl

N° d'autorisation délivré par l'ANSM : 2017-A02865-48

Figure 21. Fiche de présentation de l'étude RSHTEN

