

# Bulletin Scientifique ASTB N°4 – 2011

## Mesure et modélisation bioénergétique des exercices intermittents - Application au tennis

Rapport sur les travaux présentés par

**Florent Botton**

en vue de l'obtention du grade de

**Docteur d'Université**

(Ecole Doctorale Interdisciplinaire Sciences-Santé)

### 1- Laurent ARSAC, Bordeaux, le 23 septembre 2011 :

Mr Florent BOTTON présente un document en cinq parties qui décrivent successivement : les séquences remarquables (« activités fondamentales ») qui composent un match de tennis ; les relations que l'on peut espérer établir entre l'activité physique au cours de telles séquences, les indicateurs mécaniques de cette activité et la dépense d'énergie métabolique (« fonctions d'astreinte ») ; une modélisation énergétique de l'activité physique fractionnée ; et une application de cette modélisation (qui se veut généralisable) au tennis.

Les parties II, III, IV et V décrivent des travaux expérimentaux réalisés par Mr BOTTON qui renvoient à des mesures quantitatives d'activité par «tracking » vidéo, de fréquence cardiaque et d'échanges gazeux pulmonaires en laboratoire sur ergomètres (tapis roulant, ergocycle) et sur le terrain (système portable de mesure d'échanges gazeux respiratoires).

La partie IV reprend les hypothèses de travail d'un modèle bioénergétique de l'activité physique développé dans le laboratoire d'accueil pour les confronter à des mesures expérimentales.

L'objectif et l'originalité du travail de thèse repose sur le développement d'une méthode qui permettrait de déterminer les parts respectives du métabolisme aérobie et anaérobie dans les activités physiques au cours desquelles se succèdent des exercices intenses, brefs et intermittents. La réflexion est correctement menée même si le modèle final est encore empreint de nombreuses incertitudes et approximations.

La part de travail expérimental est conséquente car Mr BOTTON a eu le souci de mettre en place autant de tests et de mesures nécessaires pour que chaque séquence de l'activité intermittente qui sert de support au modèle, le tennis, trouve dans la modélisation énergétique une part de validation expérimentale.

Il existe des publications des travaux afférents à la thèse dans des revues internationales : deux articles en français et deux articles en anglais sont publiés ou acceptés pour publication à ce jour.

Après examen du document écrit fourni par Mr BOTTON, je donne un avis favorable à la soutenance de la thèse.

## **2-Dr. Esteban Gorostiaga : Pamplona, le 30 Septembre 2011**

Ce travail de thèse a fait l'objet de quatre publications comme premier auteur dans les revues suivantes : *Medicine and Science in Tennis (2011J)*, *Science et Motricité (sous presse)*, *Sciences et Sports 2007 and Journal of Strength and Conditioning Research (sous presse)*.

L'objectif du travail est de valider une méthode simple et accessible permettant d'estimer les parts respectives des métabolismes aérobie et anaérobie, quelle qu'en soit la forme, la puissance et la durée, en prenant comme exemple l'activité fractionnée du tennis qui comporte des gammes de puissances et de durées très étendues. Ce travail comporte une introduction générale, une conclusion générale et 5 travaux expérimentaux : 1) descriptif fin de l'activité «tennis» avec une caractérisation spatiotemporelle de 7 activités fondamentales du tennis (AF) permettant de sélectionner la grandeur mécanique ayant le plus d'impact sur la dépense énergétique, 2) préciser les coefficients caractéristiques des fonctions d'astreinte pour les 7 AF et présenter une méthode permettant de déterminer le coût énergétique et la puissance métabolique moyenne des frappes de balle, 3) déterminer les coordonnées spatiotemporelles X, Y et t du sujet et diagnostiquer les AF en utilisant une méthode simple et accessible (une caméra, un PC et un logiciel d'exploitation), 4) proposer un modèle physiologique pour l'appliquer à la modélisation de la cinétique de la consommation d'oxygène, quelles que soient les formes de contrainte lors de tout type d'exercice, et 5) appliquer le modèle physiologique pour estimer les parts respectives d'aérobiose et d'anaérobiose au cours du tennis. En 3 annexes sont aussi présentés un programme de transformation des pixels x et y en coordonnées de terrain X et Y, des exemples individuels d'évolution des fréquences cardiaques mesurées et estimées à partir du modèle physiologique et enfin, une copie des quatre publications dérivées de ce travail.

Ce travail a été réalisé d'une façon rigoureuse et est bien écrit. Il aborde avec peu de moyens le sujet classique de la mesure et l'estimation de la dépense énergétique des activités physiques d'une façon très particulière. La méthode d'estimation de la dépense énergétique des activités fondamentales du tennis est très originale, et même si elle reste à vérifier de façon expérimentale, ses résultats semblent être en accord avec ceux obtenus avec des méthodes plus sophistiquées, coûteuses et sanglantes comme par exemple, ceux utilisant la ponction biopsie musculaire. La méthode de détermination des coordonnées spatiotemporelles et du diagnostic des AF, bien que trop longue, a l'avantage d'être simple, accessible et gratuite dans sa forme manuelle, même si l'utilisation d'une seule caméra augmente l'erreur de mesure lorsque le joueur est à proximité du filet. La modélisation de la cinétique de la consommation d'oxygène au cours d'un match de tennis est basée sur des données personnelles et de la littérature, elle est rigoureuse et précise d'un point de vue mathématique et permet d'estimer d'une façon assez précise la dépense de cette activité complexe et fractionnée composée d'activités très différentes. Cette modélisation est basée sur la grande complexité des systèmes de régulation de l'être humain considéré dans son ensemble. Cette perspective physiologique essaye de comprendre comment est commandé le milieu interne de l'organisme dans son ensemble et la façon dont l'organisme interagit avec le milieu extérieur. Malheureusement, cet abord intégral de l'être humain a été trop négligé dans les dernières décennies et il a été remplacé par une perspective trop réductionniste qui a essayé d'expliquer avec très peu de succès le fonctionnement de l'être humain sain et malade par des abords biochimiques, pharmacologiques ou moléculaires (Joyner and Pedersen *J.Physiol.* 589(5) :1017-1030, 2011) (Greenhaff and Hargreaves *J.Physiol.* 589(5) :1031-1036, 2011) (Wagner and Paterson *Am.J.Physiol. Endocrinol. Metab.* 301 :E427-E428, 2011). Dans ce contexte, le sujet abordé dans cette thèse est peut-être le témoin du retour de la «vieux» physiologie, alors même que le monde scientifique commence à s'apercevoir que trop d'argent et des moyens ont été dépensés pour la recherche et la formation de scientifiques qui ne sont jamais allés voir plus loin que la membrane de la cellule! Enfin, l'estimation de la participation du métabolisme aérobie et anaérobie des différentes AF fondamentales et du match du tennis dans son ensemble, même si elle est soumise à erreur, permet de penser que la participation du métabolisme anaérobie dans la fourniture d'énergie a été largement sous-estimée. Ces résultats permettent de penser que cette sous-estimation de l'apport du métabolisme anaérobie pourrait aussi avoir lieu dans les activités considérées traditionnellement comme aérobies (exemple : exercice continu de puissance inférieure à la zone de transition aérobie-anaérobie). La découverte d'une participation plus importante du métabolisme anaérobie devrait s'accompagner d'une modification des systèmes d'entraînement sportif des activités dites «aérobies» qui devraient mettre davantage l'accent sur l'entraînement de la force musculaire mais dans des conditions d'une grande participation des phosphagènes et d'une faible participation de la glycolyse anaérobie.

## Commentaires spécifiques des 5 travaux expérimentaux, de l'introduction et de la conclusion générale :

1) Introduction générale. Le rappel historique est nécessaire et bien documenté, même si entre les travaux cités de Hill ou de Meyerhoff, et celui de Margaria et col. (1933), l'auteur a oublié de citer les travaux clés sur la découverte des fonctions des phosphagènes (Eggleton and Eggleton. Nature 119 :194-195. 1927) (Lundsgaard. Biochem. Z., 217 : 162-177, 1930) (Lohmann 233 :460- 472, 1931) (Lohmann Biochem. Z. 282 :120-123, 1935) que Margaria et col. ont considéré comme «révolutionnaires» dans l'histoire de la physiologie de l'exercice (Margaria et col. Am.J.Physiol. 106 :689-715). De même, il ne faut pas oublier qu'on ne peut pas toujours interpréter l'augmentation de la production d'acide lactique comme un reflet exclusif de la participation du métabolisme anaérobie puisque déjà en 1931, Orskow (cité par Karlsson, Acta Physiol. Scand. Suppl. 358, 1971) avait montré une augmentation de la concentration musculaire de lactate au repos chez l'animal soumis à un régime alimentaire riche en glucides. La synthèse sur les mesures indirectes et directes de la dépense énergétique est très complète et bien résumée. Les dissociations entre la fréquence cardiaque et la consommation d'oxygène pendant les exercices d'intensité sous-maximale auraient pu être traitées de façon un peu plus développée, en ajoutant la dérive paradoxale (diminution de la fréquence cardiaque et maintien ou augmentation de la consommation d'oxygène) qui semble se produire lors des exercices de très longue durée (plusieurs heures) (Mattsson et al. Med.Sci.Sports Exerc. 43(7) : 1162-1168, 2011).

2) La partie I (descriptif fin de l'activité «tennis» avec une caractérisation spatio-temporelle de 7 activités fondamentales du tennis (AF) permettant de sélectionner la grandeur mécanique ayant le plus d'impact sur la dépense énergétique) montre un démontage minutieux et précis de l'activité du tennis. Ce démontage permet d'étudier de façon individuelle chacune des activités fondamentales du jeu ainsi que l'enchaînement le plus probable des séquences d'activités. Bien que le travail permette d'avoir une idée assez précise de l'activité «Tennis», le travail aurait été plus représentatif du tennis si l'échantillon avait été plus important (plus de jeux, joueurs de différents niveaux, jouant sur différentes surfaces, etc.). Cette carence aurait pu être compensée par une plus grande révision bibliographique sur le sujet. Une plus grande critique de la méthode employée, avec une étude de reproductibilité aurait peut-être pu expliquer les différences entre ce travail et ceux de la littérature concernant la distance moyenne de déplacement (2.20 mètres contre 2.50-3.00 mètres).

3) La partie II (détermination des coefficients caractéristiques des fonctions d'astreinte pour les 7 AF et présentation d'une méthode permettant de déterminer le coût énergétique et la puissance métabolique moyenne des frappes de balle) est très intéressante d'un point de vue théorique et pratique parce qu'elle permet d'estimer à partir des étalonnages au laboratoire ou sur le terrain, la dépense énergétique des AF très étudiées dans la littérature (marche, repos), mais aussi celles très peu étudiées comme, par exemple, le déplacement en pas chassés et, notamment, les activités d'attention et de frappe de balle. Ces dernières ont été abordées de façon très originale en mesurant ou estimant la dépense énergétique aérobie des frappes réalisées à des cadences de frappe progressivement croissantes et en utilisant un modèle linéaire simple. La variable «dépense énergétique par coup», calculée à partir du modèle linéaire, permet d'estimer la participation relative du métabolisme aérobie et anaérobie, même si elle devra être vérifiée de façon expérimentale. Ces mesures et calculs permettent aussi de tester la dépense énergétique, l'efficacité et l'aptitude physique aérobie du joueur de tennis non seulement de la façon non spécifique classique (test progressivement croissant en vélo ou en course à pied en ligne droite), mais aussi lors des activités fondamentales du tennis. Ceci permettra de mieux évaluer l'aptitude physique du joueur de tennis et de mieux orienter son entraînement. Comme critique du travail, je n'arrive pas à comprendre pourquoi tout le travail n'a pas été fait sur le terrain avec le poste de métabolisme portable Cosmed k4b2. La première partie (étalonnage au laboratoire) dans laquelle l'auteur a essayé, sur un tapis roulant, de quantifier les AF du tennis, a beaucoup de mérite et a dû supposer beaucoup de temps d'expérimentation et de travail, mais les résultats doivent être traités avec beaucoup de prudence car les activités sur tapis roulant ne sont pas assez spécifiques, du fait des problèmes de stabilité, du risque de chute et des difficultés à se déplacer en pas chassés ou de reproduire les frappes de balle de façon précise. De même, la mesure additionnelle d'un témoin indirect du métabolisme anaérobie facilement mesurable, comme celui de la concentration sanguine du lactate, aurait complété l'étude. Par exemple, il est très probable qu'à l'intensité relative d'exercice atteinte pendant le test du service (82% de  $\dot{V}O_{2max}$ ), les concentrations sanguines et musculaires de lactate soient bien supérieures par rapport à celles observées lors des exercices de course à pied en ligne droite de même intensité relative. Enfin, une comparaison entre les données de la dépense énergétique des frappes de balle trouvées dans ce travail, et celles qu'on peut calculer dans la littérature à partir des mesures des métabolites musculaires lors des exercices intenses et très brefs (durée de la contraction inférieure à 1 seconde, exercices de force musculaire) aurait amélioré la qualité de la discussion et aurait probablement renforcé les données expérimentales de ce travail.

4) La partie III détermine les coordonnées spatiotemporelles X, Y et t du sujet et diagnostique les AF en utilisant une méthode simple et accessible. Ce travail a le mérite d'utiliser une méthode simple et accessible de mesure des déplacements et des AF du tennis en utilisant une caméra vidéo, un ordinateur et un logiciel. L'erreur commise dans la mesure n'est pas très importante (entre 0.18 m et 0.78 m dans l'axe Y, et entre 0.16m and 0.34m dans l'axe X). Par ailleurs, l'auteur a développé un logiciel de mesure semi- automatique permettant de mesurer les déplacements et les AF du tennis en moins de temps. Ce système de mesure, très intéressant et accessible, devrait avoir un développement ultérieur pour améliorer la vitesse d'analyse (pour l'instant, 45 minutes supplémentaires de travail toutes les 10 minutes d'enregistrement) et diminuer les erreurs commises pour détecter les séquences de jeu (15%) ou les services (8%), ainsi que pour améliorer la mesure des déplacements lorsque le joueur s'approche du filet. Les modifications proposées par l'auteur dans un futur développement du système (algorithme de détection de l'image et du suivi du joueur plus fidèle et analyse sonore des frappes de balle) pourraient aboutir à un séquençage totalement automatique, améliorer le système et permettre de le commercialiser.

5) La partie IV propose un modèle physiologique (le modèle appelé «Astrabio») pour l'appliquer à la modélisation de la cinétique de la consommation d'oxygène, quelles que soient les formes de contrainte, lors de tout type d'exercice. L'utilisation d'un modèle mathématique basé sur la théorie des asservissements des systèmes vivants et plus particulièrement, sur des équations décrivant l'adaptation des différentes filières métaboliques aux variations de la dépense énergétique permettant de prédire la consommation d'oxygène pour tout type d'exercices, est très intéressante et elle a été déjà commentée dans la partie générale de ce rapport. La prédiction est très satisfaisante pour l'exercice d'intensité sous-maximale d'intensité constante (IM) mais un peu moins précise pour l'exercice fractionné de haute intensité (IMSM). Compte-tenu du caractère interdisciplinaire de la thèse, les méthodes et les relations mathématiques utilisées dans le modèle auraient pu être expliquées de façon plus claire et plus étendue. L'auteur n'a pas expliqué les raisons pour lesquelles les 9 travaux de la littérature ont été choisis pour étudier le modèle. L'excellent travail d'Ozyener et al. (J.Physiol. 533(3) : 891-902, 2001), cité par l'auteur de cette thèse, mais qui n'a pas été choisi pour vérifier le modèle Astrabio, aurait peut-être mérité d'être choisi en raison de sa qualité et aussi pour rendre hommage aux équipes des Professeurs B.J. Whipp and K. Wasserman qui ont beaucoup travaillé et publié depuis des décennies sur les cinétiques de la consommation d'oxygène lors des phases d'accrochage et de décrochage des exercices de différentes intensités. Par ailleurs, l'important travail de Medbo et Tabata (J.Appl.Physiol. 75(4) : 1654-1660, 1993) qui montre des résultats similaires des calculs de participation du métabolisme anaérobie lorsqu'il est estimé par la mesure de la consommation d'oxygène (déficit O<sub>2</sub>) ou par l'évolution de la concentration musculaire des substrats lors des exercices d'intensité supra-maximale, aurait du être au moins cité et discuté.

6) La partie V a estimé les parts respectives d'aérobiose et d'anaérobiose au cours du tennis, en appliquant le modèle physiologique Astrabio, en le comparant avec l'enregistrement de la mesure de la consommation d'oxygène. Les résultats de l'étude montrent que la quantité réelle d'énergie expérimentale dépensée pour chaque jeu peut être très bien estimée ( $r=0.92$ ) par le modèle Astrabio tandis que la dépense énergétique mesurée par le K4b2 où la fréquence cardiaque mesurée par un cardio-fréquencemètre peut aussi être estimée, mais avec moins de précision ( $r=0.65-0.85$ ). Le travail montre aussi que la dépense anaérobie estimée lors des jeux (34% du total), points (70% du total) et frappes (94% du total) est très élevée, et provient (94%) presque exclusivement des phosphagènes, et qu'elle doit être prise en compte lorsqu'on estime la participation moyenne du métabolisme anaérobie lors du match (28% du total lors du match entier y compris le repos ou 34% sans tenir compte des phases de repos). Les commentaires sur la méthodologie de ce travail ont été signalés dans les commentaires des travaux précédents. Ces résultats devraient être confirmés par des mesures des témoins du métabolisme anaérobie. Comme il a été signalé précédemment, la confirmation d'une participation plus importante du métabolisme anaérobie devrait s'accompagner d'une modification des systèmes d'entraînement sportif du tennis qui devraient mettre plus d'accent sur l'entraînement de la force musculaire, mais dans des conditions d'une grande participation des phosphagènes et d'une faible participation de la glycolyse anaérobie (durée très faible, peu de répétitions et beaucoup de temps de repos).

7) Quelques détails à corriger: (ml/min/kg) devrait être remplacé par (ml/minxKg) ou par  $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{Kg}^{-1}$  tout au long du manuscrit; de même pour ml/Kg/coup ; de même pour +/- qui devrait être remplacé par  $\pm$  ; Page 5 (Osgnach et coll. 2010); Page 7 (Krustrup et coll. 2006); Page 19 :25/seconde ; page 26 (tableau 6 ??) ; Page

42, tableau 3 : la durée t(min) devrait être corrigée ; Page 162 , formule de VMA (Km/h) :  $= 1.1 * DEmvIo / 3.5 \times$  Poids corporel) ;

En conclusion, le document qui m'a été confié est complet et bien construit : il met en exergue l'ensemble des travaux scientifiques que Mr Florent Botton a effectué pendant sa thèse. Le candidat a montré sa maîtrise à utiliser et à interpréter les résultats des différents outils de mesure de l'aptitude physique et de la dépense énergétique du tennis, ainsi que de la mise au point et vérification expérimentale d'un modèle physiologique qui essaye de modéliser la cinétique de la consommation d'oxygène quelles que soient les formes de contrainte lors de tout type d'exercice. Comme le signale l'auteur dans sa conclusion finale, si cette étude s'accompagne dans un futur d'une automatisation complète et soumise à moins d'erreurs du diagnostic des AF à partir du traitement des bandes son et image de l'enregistrement vidéo, d'une estimation de la vitesse de balle et d'un affichage en temps réel des résultats des dépenses énergétiques aérobie et anaérobie, ce système pourrait devenir le système de référence de la mesure et l'estimation de la dépense énergétique du tennis. Reste à savoir si l'utilisation de ce système avec une seule caméra est aussi valable pour mesurer des activités plus complexes qui se produisent sur une grande surface et avec de contacts entre les adversaires (exemple : sports d'équipe), et si la mesure des cinétiques de fréquence cardiaque (battement par battement) lors des changements brusques de dépense énergétique peuvent estimer avec précision celles de la consommation d'oxygène et diminuer l'erreur d'estimation de la dépense énergétique.

Par conséquent, je donne un avis favorable à la présentation publique de la thèse de Mr Florent BOTTON devant le jury, au sein de l'Université CLAUDE BERNARD - LYON1.