



HAL
open science

Influence des variables de contrôle sur l'émergence des paradigmes physiologiques de la performance en course à pied

Claire Molinari

► **To cite this version:**

Claire Molinari. Influence des variables de contrôle sur l'émergence des paradigmes physiologiques de la performance en course à pied. Education. Université Paris Saclay (COMUE), 2019. Français. NNT: 2019SACLE020 . tel-03920260

HAL Id: tel-03920260

<https://theses.hal.science/tel-03920260>

Submitted on 3 Jan 2023

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

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

Influence des variables de contrôle sur l'émergence des paradigmes physiologiques de la performance en course à pied

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay, préparée à
l'Université d'Evry Val d'Essonne

École doctorale n°577 Structure et Dynamique des Systèmes Vivants (SDSV)
Spécialité de doctorat : Sciences de la vie et de la santé

Thèse présentée et soutenue à Evry, le 18 Décembre 2019, par

Claire Molinari

Composition du Jury :

Nicolas Peyrot Professeur des Universités, Université du Maine	Président du jury Rapporteur
Stefano Lazzer Professeur associé, Università degli studi di udine	Rapporteur
Anne Marie Heugas Maitre de Conférences Universitaire, Université Paris-sud, Paris-Saclay	Examinatrice
Stéphane Labbé Professeur des Universités, l'Université Joseph Fourier	Examineur
Caroline Nicol Maitre de Conférences Universitaire (HDR), Faculté des Sciences du Sport - Aix-Marseille Université	Examinatrice
Sophie Besse Maitre de Conférences Universitaire (HDR), Sorbonne Université	Directrice de thèse
Véronique Billat Professeur des Universités, Université Paris Saclay Evry Val d'Essonne	Co-Directrice de thèse

Invité :

Jean Pierre Koralsztein
Médecin du sport, Président de l'entreprise BillaTraining

REMERCIEMENTS

Je tiens dans un premier temps à remercier le Pr. Nicolas Peyrot et Dr. Stefano Lazzer de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse. Je vous suis reconnaissante de vos remarques d'experts on ne peut plus pertinentes sur mon manuscrit qui m'ont permis de l'améliorer. J'exprime ma gratitude respectueuse au Pr. Stéphane Labbé, au Dr. Anne-Marie Heugas ainsi qu'au Dr. Caroline Nicol, qui ont bien voulu être examinateurs, me permettant ainsi de bénéficier de leur expertise.

Je remercie mes directrices de thèse, le Pr. Véronique Billat et le Dr. Sophie Besse qui m'ont encadré tout au long de ces trois années. Sophie, je vous remercie pour cet encadrement avec bienveillance, confiance et droiture.

Véronique, je vous remercie pour votre confiance en amont de cette thèse, vous avez comme on dirait pris le pari de m'amener à réaliser une thèse alors que j'avais simplement fait mon stage de fin d'étude à vos côtés. Bien sûr, je vous remercie également pour avoir fait perdurer cette confiance tout au long de la thèse et pour tout le savoir que vous me transmettez chaque jour.

Une thèse CIFRE ne se réalise pas sans une entreprise et son Président. Je tenais donc à remercier l'entreprise BillaTraining pour le matériel d'excellence mis à ma disposition, le financement accordé à cette thèse et mon emploi actuel dans celle-ci. Je remercie également le Dr. Jean Pierre Koralsztein pour son accompagnement bibliographique, ses relectures et corrections mais aussi pour sa confiance et son soutien. Au sein de l'entreprise BillaTraining, je tenais à remercier Thomas pour son accueil dans l'entreprise alors qu'il était le seul salarié et pour son travail dans l'entreprise qui m'a permis d'avancer sur ma thèse en toute tranquillité. Florent, Luc et Pierre pour avoir trouvé tous ces sujets volontaires et m'avoir accompagné lors des protocoles.

Je remercie vivement Mr. Martin Van Den Berg et Mme Laure Polge, Cosmed® France, pour leur prêt de matériel supplémentaire mais surtout pour leur patience envers toutes mes questions et aléas techniques, ce qui m'a permis de réaliser des protocoles sans soucis de matériel.

Un grand merci à tous les membres de l'UBIAE, Iman, Laurence M-H, Laurence LM et Thierry, pour votre accueil, votre écoute et votre patience à mon égard. Je suis consciente de mes débarquements dans vos bureaux et du temps que vous avez pris pour m'écouter et répondre à mes interrogations. Je vous remercie pour votre soutien chaleureux.

Je tiens également à remercier Carmen qui lors de son année à l'UBIAE m'a conforté dans mes décisions, toujours avec le sourire, la joie de vivre et la passion de son métier, cela m'a permis d'être toujours motivée.

Enfin, je finirai par mes remerciements envers mes amis et ma famille. Maëva et Florian à mes côtés depuis 13 ans malgré un éloignement de 900 km ces dernières années, merci pour votre soutien à tout épreuve et l'amitié que nous partageons. Alina et Marie pour m'avoir encouragé à faire la thèse après nos années de master. Marie-Laure et Pierre pour avoir été sujets des protocoles, mais aussi pour avoir été à nos côtés en région parisienne. A nos côtés, parce que lors de la préparation d'une thèse il faut aussi féliciter le conjoint. Jérémy, c'est toi qui as supporté toutes mes variations d'humeur, qui m'a motivé, qui a facilité le quotidien pour accomplir l'objectif de la thèse. Alors un immense merci à toi Jérémy, qui m'a poussé à faire une thèse, qui m'épaule jour et nuit, qui fait preuve d'une grande patience, qui a dû faire des concessions. Merci à ma belle-famille pour son soutien.

Un grand merci à Claudie et Pierrot pour avoir été à mes côtés depuis toutes ces années.

Ma Maman, Merci à toi qui a fait de moi ce que je suis, qui m'a toujours inculqué des valeurs fortes, d'optimisme, d'empathie, de respect, ce qui me permet d'avancer et de me surpasser car était bien loin de moi l'idée de faire une thèse, avoir un master était déjà beaucoup. Merci pour ton soutien et ta présence inconsiderés, d'ailleurs un merci ne vaudra jamais tout ce que tu fais pour moi...

Je remercie mon Papa qui m'a toujours fait savoir qu'il serait là. Merci à mon petit frère pour son soutien et sa compréhension à mon égard malgré la distance ainsi qu'à Isa et mes tantes.

Merci, à ma tante Anne et mon oncle Alain, qui m'ont permis de réaliser mon stage de fin de Master à Grenoble avec Véronique. Tous deux, toujours avec des conseils avisés et du soutien. Alain, ton Edelweiss m'a porté chance, je suis fière d'avoir pu échanger avec toi ces premières années de thèse et je sais que tu aurais été fière d'être là le jour J, d'ailleurs pour moi tu étais près de moi.

Les mots manquent aux émotions

Victor Hugo

ABBREVIATIONS

ATP	Adénosine triphosphate	
CaO ₂	Contenu artériel en Oxygène	mLO ₂ .100mL ⁻¹ de sang
CvO ₂	Contenu veineux en Oxygène	mLO ₂ .100mL ⁻¹ de sang
CO ₂	Dioxyde de Carbone	mL
Dlim	Distance limite	Mètres
E@ $\dot{V}O_{2max}$	Energie à $\dot{V}O_{2max}$	Joules.s ⁻¹ .kg ⁻¹
Eaérobie	Energie aérobie	Joules.s ⁻¹ .kg ⁻¹
Eanaérobie	Energie anaérobie	Joules.s ⁻¹ .kg ⁻¹
ETL	Estimation du temps limite	Minutes
Etot	Energie totale	Joules.s ⁻¹ .kg ⁻¹
FC	Fréquence cardiaque	Battements.min ⁻¹
GXT	« Graded exercise test » test incrémenté	
MLSS	« Maximal Lactate Steady State » Etat stable de la lactatémie	mmol.L ⁻¹
O ₂	Oxygène	
PaO ₂	Pression artérielle en O ₂	mmHg
P $\dot{V}O_{2max}$	Puissance à $\dot{V}O_{2max}$	Watts
Q _c	Débit cardiaque	L.min ⁻¹
QR	Quotient respiratoire	
Ra	Rate of appearance	
RABIT [®]	Running Advisor Billat Training	
Rd	Rate of disappearance	
RPE	« Rating of Perceived exertion » Echelle de perception de l'effort	
SaO ₂	Saturation artérielle en oxygène	
SPV	« Self-paced $\dot{V}O_{2max}$ test »	
SV	Seuil ventilatoire	
Tlim	Temps limite	Secondes
Tlim@ $\dot{V}O_{2max}$	Temps limite à $\dot{V}O_{2max}$	Secondes
UMTT	« University Montréal Track Test »	
$\dot{V}CO_2$	Consommation de dioxyde de Carbone	mL.min ⁻¹
\dot{V}_E	Débit ventilatoire	L.min ⁻¹

VES	Volume d'éjection systolique	mL.battements ⁻¹
VMA	Vitesse maximale aérobie	km.h ⁻¹
$\dot{V}O_2$	Consommation d'oxygène	mL.min ⁻¹
$\dot{V}O_{2max}$	Consommation d'oxygène maximal	mL.kg ⁻¹ .min ⁻¹
$v\dot{V}O_{2max}$	Vitesse associée à $\dot{V}O_{2max}$	km.h ⁻¹
W_{CL}	Vitesse maximale d'état stable de la lactatémie	km.h ⁻¹

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Echelle d'évaluation de l'effort perçu, Borg 1982 modifiée en 1988.	48
Tableau 2 : Estimation du temps limite : ETL. « Combien de temps pourriez-vous tenir au maximum à cette intensité ? » (220).....	49
Tableau 3 : Tableau traduit de l'American College of sports Medicine (2018).	143

LISTE DES ÉQUATIONS

Équation 1 : Où, [Hb] représente la concentration sanguine en hémoglobine (g.dL^{-1}), SaO_2 la saturation en oxygène (en fraction), 1,39 le coefficient de fixation de l'oxygène sur Hb, PaO_2 (mm Hg) la pression artérielle en oxygène et 0,0031 le coefficient de solubilité de l'oxygène dans le sang.....	6
Équation 2 : Où, T_{lim} est le temps limite (secondes), « a » est assimilé à une réserve de puissance en mètres qu'il est possible de parcourir sur les réserves d'oxygène, et l'énergie fournie par les métabolismes anaérobies, b est la vitesse critique c'est-à-dire la vitesse maximale (m.s^{-1}) compatible avec la reconstitution de ces réserves par les métabolismes aérobies (22).....	8
Équation 3 : Où, Δ est le delta entre le début de l'exercice et la fin de l'exercice.	12
Équation 4 : Où P est la puissance de l'exercice (ici la vitesse), t est le temps et W est le travail (ici la distance puisque à une distance parcourue correspond une dépense d'énergie en joules par le temps).	14
Équation 5 : Où, $\dot{V}\text{O}_2$ est la consommation d'oxygène en L.min^{-1} ; \dot{Q}_c est le débit cardiaque en L.min^{-1} ; CaO_2 est le contenu artériel en oxygène en mL d' O_2 par 100 mL de sang (artériel) et CvO_2 est le contenu veineux en oxygène en mL d' O_2 par 100 mL de sang (veineux).	17
Équation 6 : Où, VMA (vitesse maximale aérobie) est exprimée en km.h^{-1} et DO_2 est le déficit en oxygène exprimé en $\text{mLO}_2.\text{kg}^{-1}$	18
Équation 7 et Équation 8 : Où, bt ; battements par minute, FC ; fréquence cardiaque en battements par minute, VES ; le volume d'éjection systolique en mL par battement, et $[\text{CaO}_2 - \text{CvO}_2]$ en mL est la différence artérioveineuse.	22
Équation 9 : Où, $v\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ est la vitesse associée à $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ (m.min^{-1}), $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ est la consommation maximale en oxygène ($\text{mL.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$) et CE, le coût énergétique ($\text{mL.kg}^{-1}.\text{m}^{-1}$).	27
Équation 10 : Où, VMA est la vitesse maximale aérobie (km.h^{-1}).....	28
Équation 11 : Où, $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ est la consommation maximale d'oxygène en $\text{mL.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ et la distance est la distance parcourue en 12 minutes (mètres).....	38
Équation 12 : Où, $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ est la consommation maximale d'oxygène en $\text{mL.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ et « 1,5 temps » est le temps mis pour parcourir les 1,5 Miles (min).	38
Équation 13, 14, 15, 16 : Où, « v » est la vitesse moyenne de la course (km.h^{-1}), $v\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ est la vitesse associée à $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ au cours de l'UMTT (km.h^{-1}), $\dot{V}\text{O}_2$ est la consommation d'oxygène moyenne ($\text{mL.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$), $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ est la consommation maximale d'oxygène ($\text{mL.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$), et t est le temps réalisé en seconde sur la distance parcourue (mètres).	59
Équation 17 : Où, $E@ \dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ est la production d'énergie à $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ ($\text{J.s}^{-1}.\text{kg}^{-1}$), $T_{\text{lim}@ \dot{V}\text{O}_{2\text{max}}}$ est le temps passé à la consommation maximale d'oxygène lors de la course et $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ est la consommation maximale d'oxygène de l'UMTT ($\text{mL.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$).	59
Équation 18 : Calcul du τ de Kendall.	60
Équation 19 : Où, $\text{mLO}_2.\text{kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ est l'énergie métabolique dépensée et m.min^{-1} est la vitesse de déplacement et le coût énergétique est exprimé en $\text{mLO}_2.\text{kg}^{-1}.\text{m}^{-1}$	133
Équation 20 : Où, la vitesse de course est estimée par l'équation en m.min^{-1} , F est la fraction de $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ en pourcentage pouvant être soutenue lors de l'épreuve et le coût énergétique s'exprime en $\text{mLO}_2.\text{kg}^{-1}.\text{m}^{-1}$	134

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 :** L'atteinte d'un "état stable" de consommation d'oxygène, lors de quatre différentes courses à vitesses constantes. L'axe horizontal représente le temps écoulé depuis le début de chaque cycle ; l'axe vertical montre la consommation d'oxygène ($L \cdot \text{min}^{-1}$). Les vitesses sont de 181, 203, 203 et 267 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ (de bas en haut). Les trois courbes inférieures représentent un véritable état d'équilibre, tandis que la courbe supérieure, montre un besoin en oxygène qui dépasse la consommation d'oxygène mesurée (11). 4
- Figure 2 :** Représentation schématique de l'utilisation et du transport de l'oxygène entre poumons et muscles et du métabolisme cellulaire (adaptée de Zhou et al., (20)). 7
- Figure 3 :** Représentation schématique de la composante lente de $\dot{V}O_2$ lors d'exercice à puissance constante dans les domaines d'intensité modérée ($<$ seuil ventilatoire), élevé ($>$ seuil lactique et $<$ puissance critique) et sévère ($>$ puissance critique jusqu'à $\dot{V}O_{2\text{max}}$). La flèche indique le point d'épuisement pendant l'exercice sévère. Les zones hachurées désignent la composante lente $\dot{V}O_2$ qui augmente $\dot{V}O_2$ au-dessus de la valeur prévue pour une puissance à partir de la relation entre la $\dot{V}O_2$ – puissance (adapté de Jones et al., (12)). ... 9
- Figure 4 :** Démonstration du calcul de l'état stable de la lactatémie. W_{CL} : puissance ou vitesse maximale d'état stable de la lactatémie, L_{WC} : lactatémie stabilisée à la puissance ou vitesse égale à W_{CL} (d'après Billat et al., 1994, (40)). 13
- Figure 5 :** Concentration moyenne de lactate plasmatique pour tous les sujets pour chaque point dans le temps (losanges pleins). Pour chaque point dans le temps, la figure représente également la concentration maximale de lactate plasmatique pour un seul sujet (cercles vides) et la concentration minimale de lactate plasmatique pour un seul sujet (cercles pleins), d'après Myburgh et al., (50). 15
- Figure 6 :** Courbes individuelles montrant une augmentation de la consommation d'oxygène au début d'un exercice intense. Sur les courbes de 2400 et 2700 kpm/min (1 kilopond, kp , est la force agissant sur la masse de 1 kg à l'accélération normale de la pesanteur), on observe l'atteinte de $\dot{V}O_{2\text{max}}$ en moins de 3 minutes (Åstrand et Saltin, (53)). 16
- Figure 7 :** Cinétique de $\dot{V}O_2$ durant un test incrémenté pour deux sujets représentatifs ayant tous les deux validés des critères secondaires d'atteintes de $\dot{V}O_{2\text{max}}$. L'un deux (carré blanc) démontre un plateau de $\dot{V}O_{2\text{max}}$. A l'inverse, le second (carré noir) ne démontre pas de plateau de $\dot{V}O_{2\text{max}}$ (d'après Howley et al., (61)). 20
- Figure 8 :** Une ligne a été tracée à travers la série de points utilisés pour construire une ligne d'économie de course et a été extrapolée selon le $\dot{V}O_{2\text{max}}$ du sujet sur tapis roulant. Une ligne perpendiculaire a ensuite été tracée entre la valeur de $\dot{V}O_{2\text{max}}$ et l'axe des x afin d'estimer la vitesse que le sujet aurait atteinte à $\dot{V}O_{2\text{max}}$. Ceci est une estimation de la vitesse maximale qui peut être maintenue par phosphorylation oxydative (d'après Barnes et Kilding, (85)). ... 25
- Figure 9 :** Comparaison de coureurs hommes et femmes sur tapis roulant à $\dot{V}O_{2\text{max}}$ égaux en fonction de la vitesse de course en $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$. Les hommes sont nettement favorisés en économie de course et en $v\dot{V}O_{2\text{max}}$ ($P < 0.05$, d'après Daniels, (90)). 26
- Figure 10 :** comparaison de coureurs et de coureuses sur tapis roulant à économie de course égale. Les carrés et les ronds se confondent jusqu'à 330 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ (90). 26
- Figure 11 :** Exemple d'évolution de la lactatémie ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) au cours d'un test triangulaire permettant la détection des seuils lactiques. 30
- Figure 12 :** Exemple d'évolution de \dot{V}_E , $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$, $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$ au cours d'un test triangulaire permettant la détection des seuils ventilatoires. 32

Figure 13 : Puissance (P) en watts pendant l'exercice intermittent. La puissance de sortie à tout moment (t) pendant un exercice intermittent, que ce soit pendant un intervalle de travail ou de repos, jusqu'à épuisement à t = 220 secondes (d'après Morton et Billat, (129)).	33
Figure 14 : Relation entre la perception de l'effort ([●], RPE de Borg, 1970, tableau 1) et l'estimation du temps limite ([○], ETL d'après Garcin et al., 1999, tableau 2) avec la vitesse exprimée en pourcentage de $v\dot{V}O_{2max}$ durant un test incrémenté jusqu'à épuisement. - droite de régression [●], r = 0,91 et --- droite hachurée de régression [○], r = 0,86, respectivement (d'après Garcin et Billat, (221)).	51
Figure 15 : Représentation schématique du protocole RABIT®.	56
Figure 16 : Exemples des différents comportements asymétriques d'une distribution de données existantes (traduite, d'après Lion., (251)).	61
Figure 17 : Relation puissance (vitesse)-temps (P(V)-t) pour les exercices de haute intensité. Notez que bien qu'il soit devenu habituel d'illustrer le modèle non linéaire à l'aide d'axes inversés, le temps reste la variable dépendante. SL est le seuil lactique, PC et VC sont la puissance ou la vitesse critique.	138
Figure 18 : Représentation schématique du modèle à double entrée permettant de choisir sa vitesse cible sur une course.	149

TABLE DES MATIERES

ABBREVIATIONS	I
LISTE DES TABLEAUX	III
LISTE DES ÉQUATIONS	IV
LISTE DES FIGURES.....	V
TABLE DES MATIERES	VII
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : ÉTAT DE L'ART.....	4
1 PROTOCOLES A PUISSANCE CONSTANTE DE L'EXERCICE.....	4
1.1 <i>Puissance constante de l'exercice et $\dot{V}O_{2max}$</i>	4
1.2 <i>Puissance constante et Puissance critique en tant que limite de la stabilisation de $\dot{V}O_2$ en dessous de $\dot{V}O_{2max}$</i>	8
1.3 <i>Puissance constante et état stable maximal de la lactémie MLSS (Maximal Lactate Steady State)</i>	10
1.4 <i>Puissance constante et temps limite à $\dot{V}O_{2max}$ (plateau)</i>	16
2 PROTOCOLES A PUISSANCE VARIABLE	19
2.1 <i>Test de Puissance incrémentée dit tests triangulaires et plateau de $\dot{V}O_{2max}$</i>	19
2.2 <i>Test de Puissance incrémentée dit tests triangulaires, économie de course et coût énergétique pour calculer $v\dot{V}O_{2max}$</i>	24
2.3 <i>Les tests en puissance augmentée par paliers et en rampe ayant permis de déterminer les seuils ventilatoires et lactiques</i>	29
2.4 <i>Les entraînements intermittents (« interval training ») : puissance critique intermittente</i>	32
3 LES TESTS DE TERRAIN OU EN LABORATOIRE ANALYSES SOUS L'ANGLE D'UNE VARIABLE DE CONTROLE	35
3.1 <i>Variable de contrôle : le temps</i>	35
3.2 <i>Variable de contrôle : la distance</i>	38
3.3 <i>Variable de contrôle : les facteurs physiologiques</i>	42
3.3.1 <i>La Fréquence cardiaque</i>	42
3.3.2 <i>Consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$)</i>	44
3.4 <i>Variable de contrôle : la perception de l'effort</i>	45
4 CONCLUSION DE L'INTRODUCTION A LA CONTRIBUTION PERSONNELLE	53
CHAPITRE 2 : CONTRIBUTION PERSONNELLE.....	54
1 OBJECTIFS SCIENTIFIQUES DE CETTE THESE	54
2 METHODOLOGIE	55
2.1 <i>Sujets</i>	55
2.2 <i>Les tests de $\dot{V}O_{2max}$: épreuves d'efforts cardio-pulmonaires</i>	55
2.2.1 <i>Le test de l'Université de Montréal (UMTT)</i>	55
2.2.2 <i>Le test RABIT®</i>	55
2.3 <i>Performance</i>	56
2.4 <i>3000 m avec consignes différentes</i>	56
2.4.1 <i>Conditions de tests</i>	57
2.5 <i>Variables analysées</i>	57
2.5.1 <i>Mesurées</i>	57
2.5.2 <i>Calculées</i>	58

2.5.2.1	La production d'énergie (étude 2)	58
2.5.2.2	Le coût énergétique et coût cardiaque de course (étude 3)	59
2.5.2.3	Distribution de la vitesse (étude 3)	59
3	RESULTATS : ETUDES EXPERIMENTALES	62
3.1	<i>Les coureurs de loisir sont capables de réguler leurs réponses physiologiques et leurs vitesses en fonction de l'intensité et de la durée des paliers, allant des zones d'entraînement sous-maximales à maximales</i>	63
3.1.1	Résumé.....	63
3.1.2	Article 1	64
3.2	<i>Énergie produite à $\dot{V}O_{2max}$ en sprint et sur longue distance</i>	90
3.2.1	Résumé.....	90
3.2.2	Article 2	90
3.3	<i>La vitesse contrôlée par un état stable physiologique permet de courir plus rapidement un 3000 m</i>	108
3.3.1	Résumé.....	108
3.3.2	Article 3	109
CHAPITRE 3 : DISCUSSION GENERALE.....		128
1	LE CONCEPT DE $\dot{V}O_{2MAX}$ ET DE PLATEAU A $\dot{V}O_{2MAX}$	128
2	LES FACTEURS PREDISPOSANT A L'APPARITION DE $\dot{V}O_{2MAX}$ ET LEUR RELATION AVEC LA PERFORMANCE	131
2.1	<i>Les seuils lactiques et ventilatoires</i>	131
2.2	<i>Le coût énergétique</i>	133
3	FACTEURS D'INFLUENCE, LES CONTRIBUTIONS ENERGETIQUES AEROBIE ET ANAEROBIE	135
4	FACTEURS D'INFLUENCE, LA VITESSE ASSOCIEE A $\dot{V}O_{2MAX}$ ET LA VITESSE CRITIQUE	137
5	LA CENTRALISATION DES FACTEURS D'INFLUENCE, <i>LE GOUVERNEUR CENTRAL</i>	140
6	UN NOUVEAU PARADIGME AUTOUR DE CES FACTEURS D'INFLUENCE DE REPONSES PHYSIOLOGIQUES DANS UN CONTEXTE DE PERFORMANCE.....	141
CHAPITRE 4 : CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....		151
REFERENCES.....		154

INTRODUCTION GENERALE

Claude Bernard (1813-1878), célèbre physiologiste Français, est le chantre de la méthode expérimentale et l'inspirateur de la méthodologie qui a sous-tendu l'élaboration de la physiologie de l'exercice. En effet, les premiers travaux de Claude Bernard, ont permis de découvrir la fonction glycogénique du foie. Ce sujet est d'ailleurs remis en pleine lumière par la sortie d'un article récent de *Nature* ayant démontré, par une analyse du biotope des marathoniens de Boston, qu'il existait une bactérie favorisant le cycle de Cori, cycle de resynthèse du lactate en glycogène dans le foie (1). Son travail scientifique s'accompagne d'une réflexion sur les sciences et la nature expérimentale de la médecine (2). Il s'intéressa plus particulièrement à la nature de la méthode expérimentale (2). Son ouvrage *L'Introduction à la médecine expérimentale* (1865) est la préface d'un ensemble inachevé, les *Principes de médecine expérimentale* (2). On peut lire ce texte inspirant tout physiologiste, a fortiori de terrain, auquel ce travail rend hommage et tente de contribuer. En particulier nous citerons ce texte qui est tiré de la 1^{ère} partie de l'Introduction à la médecine expérimentale. « Le savant qui veut embrasser l'ensemble de principes de la méthode expérimentale doit remplir deux ordres de conditions et posséder deux qualités de l'esprit qui sont indispensables pour atteindre son but et arriver à la découverte de la vérité. D'abord le savant doit avoir une idée qu'il soumet au contrôle des faits ; mais en même temps il doit s'assurer que les faits qui servent de points de départ ou de contrôle à son idée, sont justes et bien établis ; c'est pourquoi il doit être lui-même à la fois observateur et expérimentateur. L'observateur, avons-nous dit, constate purement et simplement le phénomène qu'il a sous les yeux. Il ne doit avoir d'autre souci que de se prémunir contre les erreurs d'observation qui pourraient lui faire voir incomplètement ou mal définir un phénomène. A cet effet, il met en usage tous les outils qui pourront l'aider à rendre son observation plus complète. Il faut observer sans idées préconçues » (3).

Nous sommes au cœur de la démonstration qu'essaye de développer la présente thèse. Son postulat est que les concepts physiologiques qui sont constitutifs du paradigme de la physiologie de l'exercice et en particulier de la performance dans le domaine de la locomotion humaine, ont été élaborés au fur et à mesure des situations expérimentales. Le début de ce paradigme fut donné, voilà un siècle par AV Hill concernant, le $\dot{V}O_{2max}$ à l'issue d'une succession de paliers de vitesse constante (4).

Mais reprenons les écrits de Claude Bernard qui initient notre démarche : « Une fois le fait constaté et le phénomène bien observé, l'idée arrive, le raisonnement intervient et l'expérimentateur apparaît pour interpréter le phénomène » (3). Ces mots sont incroyables

d'actualité alors que nous sommes assaillis par les nouvelles technologies qui soulignent le rôle fondamental du protocole, et de sa mise en perspective expérimentale. Nous allons donc passer en revue, l'émergence des concepts en fonction des variables de contrôles (variables imposées au sujet) et du protocole les ayant faits émergés de façon incidente ou fondamentale. En effet, le cadre conceptuel de la physiologie de l'exercice s'est construit depuis un siècle, sur l'émergence de seuil et de limites, au fur et à mesure des expérimentations selon des protocoles utilisant des variables de contrôle différentes.

Rappelons qu'un paradigme est un modèle cohérent qui repose sur un fondement défini (matrice disciplinaire, modèle théorique, courant de pensée). Les paradigmes sont selon le philosophe des sciences, Thomas Samuel Kuhn, des « découvertes scientifiques universellement reconnues qui, pour un temps, fournissent à un groupe de chercheurs des problèmes types et des solutions » (5). Dans le domaine de la physiologie de l'exercice, ce fut ainsi, et cela s'amplifie aujourd'hui. Bien au-delà des enjeux politiques, le sport revêt des enjeux économiques afin de déterminer la performance d'une personne, d'une espèce animale, d'essayer de la dépasser ou au contraire de détecter le caractère impossible et donc une tricherie potentielle.

De même, la caractérisation des performances sportives s'appuie sur de nouveaux outils de description de la dynamique physiologique des sportifs de haut niveau (6). Ces performances ont été fondées sur le poids de l'évolution des performances passées sans changer de paradigme. C'est-à-dire :

- sur des prédictions de vitesse basées à partir des modèles de di Prampero (7) ou Joyner (8)
- sur les valeurs de références de $\dot{V}O_{2max}$ des champions.
- sur les fractions d'utilisation de $\dot{V}O_{2max}$ en marathon.
- et leur rendement énergétique basé sur la valeur de la consommation d'oxygène à une vitesse marathon (estimée à 90% du seuil lactique, soit 80% de la vitesse à $\dot{V}O_{2max}$) ou encore, selon le modèle de Jones (9) à 94-98% de la vitesse critique (plus haute vitesse durant laquelle seul le métabolisme aérobie est impliqué dans la production d'énergie).

Toutes ces estimations sont basées sur le paradigme physiologique selon lequel la variable de contrôle est la vitesse constante qui fut expérimentalement utilisée afin de faire émerger les concepts de vitesses seuil que nous allons redéfinir tout au long de cette introduction générale, avant de proposer un nouveau paradigme issu de nouvelles situations expérimentales. Nous allons soutenir l'idée d'une approche écologique (c'est-à-dire s'adapter aux contraintes de l'environnement en fonction de sa propre spécificité) selon laquelle, le sujet est considéré comme

le générateur de la solution d'optimisation de sa performance. A vrai dire, en auto régulant sa vitesse, ou plutôt, sa variation de vitesse si l'on se réfère aux récentes publications ayant démontrées que le coureur, même non élite, était capable de courir à accélération constante selon des consignes d'intensités croissantes (10).

Mais auparavant, nous avons, dans cette thèse, voulu poser les bases d'une possibilité d'auto-régulation en choisissant de contrôler son allure « à la sensation ». Nous avons tenté d'isoler ces variables de contrôle en sachant par avance, qu'une approche en système complexe, mettant en relation plusieurs variables pour les constituer en facteurs, sera la clef de la compréhension de cette autogestion de l'énergie humaine et de son débit à savoir la puissance de l'exercice.

Nous allons présenter l'évolution des approches expérimentales et leurs conséquences sur l'émergence des facteurs physiologiques de la performance. Nous rappellerons comment le concept de $\dot{V}O_{2max}$ est apparu à l'issue d'un protocole de vitesse constante alors que le prix Nobel AV Hill en 1927, courait sur tapis roulant de 10 à 16 km.h⁻¹ pour découvrir que la consommation d'oxygène plafonnait (4). De même, la notion de puissance associée à un état stable de la lactatémie considérée au départ comme le seuil d'acidose est apparu lors de protocoles à puissance constante. Les états transitoires quant à eux ont fait émerger les concepts de seuils lactiques et ventilatoires. La puissance critique assimilée à un seuil au-delà de laquelle il est impossible de stabiliser son $\dot{V}O_2$ en dessous de $\dot{V}O_{2max}$, a été conçue en utilisant des exercices maximaux de temps limite à vitesse constante.

CHAPITRE 1 : ÉTAT DE L'ART

1 Protocoles à puissance constante de l'exercice

1.1 Puissance constante de l'exercice et $\dot{V}O_{2max}$

Il fallut attendre la période des années 1920 pour que les concepts de $\dot{V}O_{2max}$, d'état stable (« steady state ») et de déficit et de dette d'oxygène (*oxygen deficit et oxygen debt*) naissent. Les premières mesures de la consommation maximale d'oxygène en situation réelle ont été réalisées par Hill et Lupton (9). Le sujet, a couru quatre paliers à puissance constante qu'il réalisait de façon indépendante (181, 203, 203 et 267 m.min⁻¹), la figure 1 illustre les variations de consommation d'oxygène dans le temps.

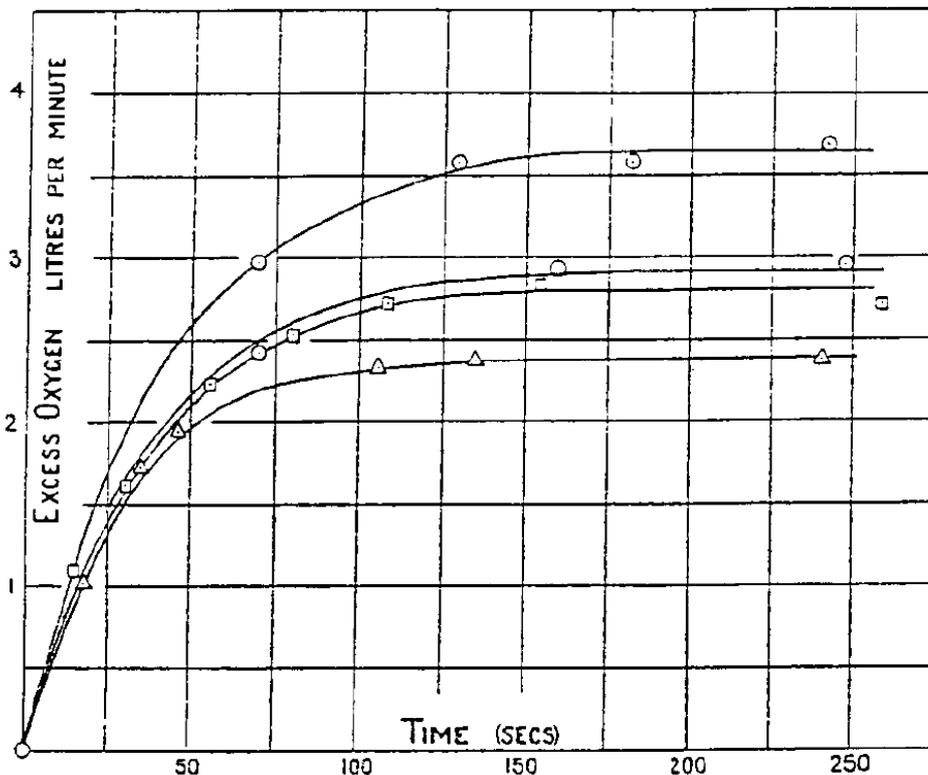


Figure 1 : L'atteinte d'un "état stable" de consommation d'oxygène, lors de quatre différentes courses à vitesses constantes. L'axe horizontal représente le temps écoulé depuis le début de chaque cycle ; l'axe vertical montre la consommation d'oxygène (L.min⁻¹). Les vitesses sont de 181, 203, 203 et 267 m.min⁻¹ (de bas en haut). Les trois courbes inférieures représentent un véritable état d'équilibre, tandis que la courbe supérieure, montre un besoin en oxygène qui dépasse la consommation d'oxygène mesurée (11).

Hill mesurait donc la consommation d'oxygène toutes les minutes et constata que :

- Les valeurs de $\dot{V}O_2$ augmentaient à chaque palier de vitesse en se stabilisant à des plateaux supérieurs après une croissance initiale exponentielle de façon proportionnelle au gain de la vitesse.
- Les $\dot{V}O_2$ des deux paliers à vitesse égales sont semblables.

Son étude lui permit également de remarquer que le dernier palier de vitesse ne permettait pas d'état stable réel de la consommation d'oxygène au cours du temps, il montrait une valeur maximale de $\dot{V}O_2$: et c'est à partir de là, que le concept de $\dot{V}O_{2max}$ est né.

La consommation maximale d'oxygène se définit comme la quantité maximale d'oxygène que l'organisme utilise pour fournir de l'énergie lors d'un exercice par unité de temps. Rapportée à une unité de temps, elle devient un débit et est exprimée $mL \cdot min^{-1}$. Cette atteinte de $\dot{V}O_{2max}$ n'est pas linéaire, Hill et Lupton (11) démontrent alors l'existence d'une dérive d'oxygène, composante lente d'ajustement de la consommation d'oxygène, qui fera l'objet de centaines de publications entre 1995 et 2005. La composante lente ($\dot{V}O_2$ dérive lentement alors que la puissance est constante) fut étudiée sous l'effet de l'intensité, de la durée (12), des produits ingérés modifiant le pH sanguin ou l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène (13). Lors des protocoles de Hill et Lupton (11), des chutes de $\dot{V}O_2$ en fin d'exercice étaient observées à partir d'une certaine vitesse pour laquelle un plateau de $\dot{V}O_2$ était insoutenable, mais soulignons que tous les modèles d'exercice de l'époque étaient des exercices à vitesse constante avec des paliers de 2 à 40 minutes. Cette chute de $\dot{V}O_2$ en fin d'exercice était 50 ans plus tard expliquée par la chute de la saturation en oxygène du sang artériel (SaO_2), due à un mauvais rapport ventilation/perfusion pulmonaire.

Hill et Lupton, confirmaient l'existence d'une chute de $\dot{V}O_2$ à l'exercice intense, de 2 à 4 minutes, en soulignant que cela ne signifiait pas pour autant une amélioration du rendement musculaire, puisqu'ils montraient en parallèle, l'augmentation de la concentration sanguine en acide lactique (11). Hill développa alors le concept de dette d'oxygène (surconsommation d'oxygène dans les 3 minutes qui suivent l'arrêt de l'exercice). Pour Hill ce qui importe n'est pas de savoir si la consommation d'oxygène est limitée, mais de savoir s'il consomme le $\dot{V}O_2$ dont il a besoin pour différer la fatigue par l'utilisation du métabolisme anaérobie. Ainsi, ne pas avoir de déficit d'oxygène pendant l'effort est révélateur d'une idée de constante raisonnable, d'homéostasie (équilibre du milieu intérieur) par état stable parfait. Les modèles d'exercice à vitesses variées, avec des alternances de la vitesse supra-maximale n'étaient alors pas envisagés. Le consensus de l'époque et toujours actuel, est que les records sont en parfait état stable

physiologique sans oscillations possibles. Et si les records étaient le résultat de changements d'états des variables physiologiques obtenus par un effort supra-maximal dans un régime de force et de vitesse ?

A cette époque, ainsi que nous l'avons évoqué, la phosphocréatine n'était pas encore connue, il faudra attendre les études de Lundsgaard et Lohmann dans les années 1930 (14,15).

Cette baisse de la consommation d'oxygène est donc considérée comme un témoin du dépassement du métabolisme aérobie pour la production de l'énergie par unité de temps de course. La plus grande part de cette dette correspond à une quantité d'énergie empruntée à des mécanismes énergétiques non oxydatifs, le métabolisme anaérobie. L'Adénosine triphosphate (ATP) et la phosphocréatine n'étant pas connus, l'équivalent énergétique de l'acide lactique accumulé était surestimé. Nous savons depuis les années 60 grâce à Margaria et al., que 1mM de lactate accumulé représente 2,7 mL d'O₂ par kilogramme de poids de corps (16,17). Pour des durées d'effort supérieures à 1 minute, la production énergétique aérobie est majoritaire et l'anaérobie minoritaire mais cette vue est obsolète puisqu'il faut à présent considérer que tous les métabolismes sont nécessaires à leur plus haut débit possible dès le début de l'exercice.

Hill et al., (18,19) recensent donc les facteurs non pas limitants mais déterminants de $\dot{V}O_{2max}$ qu'il classe en 4 catégories :

1. La pression partielle de l'oxygène dans les poumons.

Il constate qu'en respirant profondément $\dot{V}O_2$ augmente légèrement mais si le sujet inhale un air enrichi en oxygène de telle sorte que $\dot{V}O_2$ passe de 20,9% (pourcentage normal quel que soit l'altitude) à une fraction d'oxygène inspiré égale à 100 % (hyperoxie), $\dot{V}O_2$ augmente de façon « considérable ». Il l'explique par le fait que l'augmentation de la pression partielle permet une accélération de la diffusion de l'oxygène de la membrane pulmonaire vers les capillaires sanguins.

2. La capacité de transport de l'oxygène dans le sang.

Il avait déjà mesuré que le contenu artériel en oxygène au repos CaO_2 (cf. Équation 1) a la valeur de 18,5 mL d'oxygène pour 100 mL de sang (à condition que la saturation de l'hémoglobine artérielle en oxygène soit de 98%).

$$CaO_2 = ([Hb] \times SaO_2 \times 1,39) + (PaO_2 \times 0,0031) \text{ en mL } O_2 \text{ dL sang} \quad \text{Eq.1}$$

Équation 1 : Où, [Hb] représente la concentration sanguine en hémoglobine (g.dL⁻¹), SaO₂ la saturation en oxygène (en fraction), 1,39 le coefficient de fixation de l'oxygène sur Hb, PaO₂ (mm Hg) la pression artérielle en oxygène et 0,0031 le coefficient de solubilité de l'oxygène dans le sang.

En résumé, plus l'exercice est intense, jusqu'à 100 % de $\dot{V}O_{2max}$, plus le contenu veineux en oxygène (CvO_2) est faible. La différence artérioveineuse [$CaO_2 - CvO_2$] augmente par la baisse de CvO_2 .

3. Le coefficient d'utilisation de l'oxygène sanguin, qui est la quantité d'oxygène utilisée par les muscles, soit la différence artérioveineuse en pourcentage du CaO_2 .

Lors de son passage à travers la cellule musculaire, la totalité de l'oxygène n'est pas entièrement extraite et utilisée et donc le contenu artériel en oxygène diminue aussi. Le débit cardiaque est si élevé, que le temps de passage du sang dans les muscles est très court.

4. Le débit cardiaque, qui est le produit du volume d'éjection systolique (VES en mL.battements⁻¹) par la fréquence cardiaque (FC en battements.min⁻¹). Il souligne le fait que le débit sanguin à l'effort augmente de 7 fois par rapport à la valeur de repos grâce à l'augmentation de la fréquence cardiaque (x 3) et celle du volume d'éjection systolique (x 1,5 à 2,5 selon le niveau de $\dot{V}O_{2max}$ des sujets).

Hill et Lupton (18) essaient de comprendre ce que l'on consomme à l'instant t lors de la cascade de l'oxygène des poumons aux muscles (Figure 2).

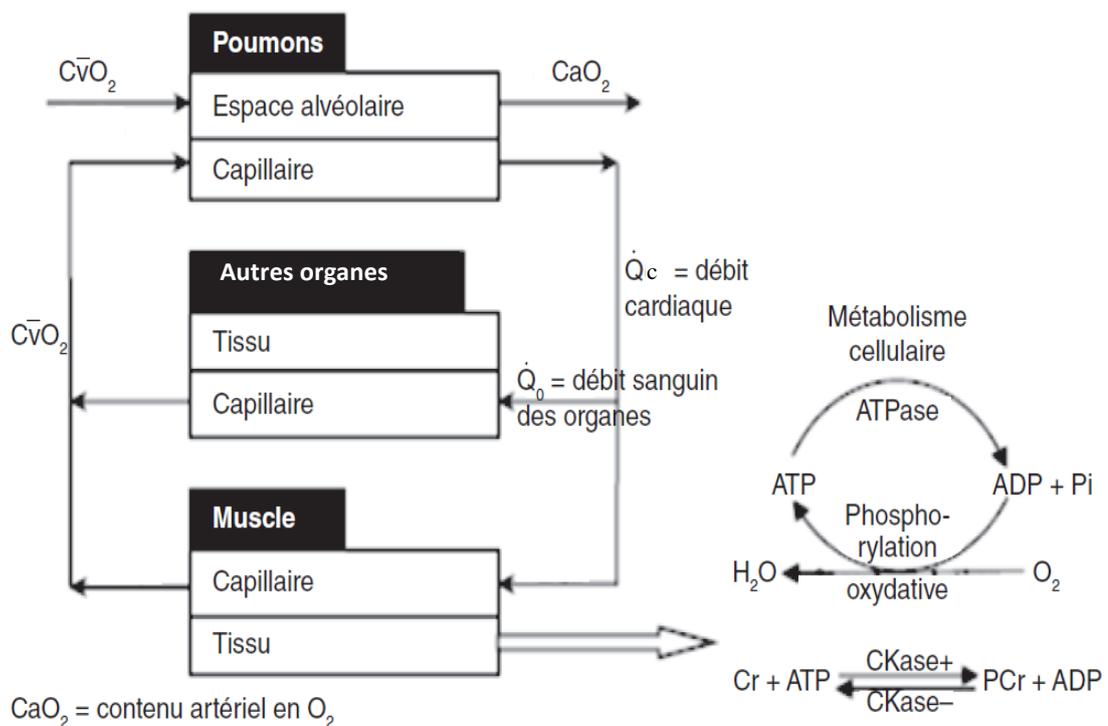


Figure 2 : Représentation schématique de l'utilisation et du transport de l'oxygène entre poumons et muscles et du métabolisme cellulaire (adaptée de Zhou et al., (20)).

1.2 Puissance constante et Puissance critique en tant que limite de la stabilisation de $\dot{V}O_2$ en dessous de $\dot{V}O_{2max}$.

La composante lente de la cinétique de l'oxygène (phase d'augmentation lente de $\dot{V}O_2$ subséquente à une phase rapide, après le seuil anaérobie lactique jusqu'à $\dot{V}O_{2max}$) a suscité un grand nombre de recherches afin de comprendre le mécanisme d'ajustement de la consommation d'oxygène vers un état stable. Brooks (21) a tout d'abord introduit la notion de débit d'apparition Ra (Rate of appearance) et de disparition Rd (Rate of disappearance) de lactate dans le sang jusqu'à un niveau de stabilisation. Il ne fixe pas de valeur seuil, ni de valeur de stabilisation maximale du lactate. Hill a continué à utiliser un protocole à puissance constante mais à durée limitée, pour révéler une non stabilisation de $\dot{V}O_2$ dans le temps qui s'avèrera plus tard être démontrée comme apparaissant au-delà de la puissance critique. En effet, la puissance (vitesse) critique est définie comme la pente de la relation linéaire de l'évolution du temps limite (Tlim, temps écoulé jusqu'à l'épuisement) en fonction de la distance limite (Dlim) (22) selon l'équation 2, proposée par Ettema en 1966 :

$$Dlim = a + bTlim \quad \text{Eq. 2}$$

Équation 2 : Où, Tlim est le temps limite (secondes), « a » est assimilé à une réserve de puissance en mètres qu'il est possible de parcourir sur les réserves d'oxygène, et l'énergie fournie par les métabolismes anaérobies, b est la vitesse critique c'est-à-dire la vitesse maximale ($m \cdot s^{-1}$) compatible avec la reconstitution de ces réserves par les métabolismes aérobie (22).

La puissance critique se situe entre la puissance à $\dot{V}O_{2max}$ et la puissance d'état stable de la lactatémie. C'est-à-dire qu'à cette vitesse, il n'est plus possible de rester à un niveau de $\dot{V}O_2$ stable sans dériver jusqu'à $\dot{V}O_{2max}$. Cette vitesse critique était d'ailleurs considérée par ses concepteurs Monod et Scherrer en 1965, comme étant une puissance associée à $\dot{V}O_{2max}$ (puissance ou vitesse maximale aérobie) (23). La puissance critique représente donc la plus haute vitesse (ou puissance) à laquelle seul le métabolisme aérobie fournit de l'énergie. Selon Hill et al., lorsqu'un coureur est à puissance critique, le $\dot{V}O_2$ atteint un état stable autour de 75% de $\dot{V}O_{2max}$ (20, 21) et est à environ 79 % de la puissance pic (26). De plus, nous savons, que si nous courons à des vitesses supérieures à la vitesse critique (à partir d'environ 90% de la vitesse maximale aérobie, VMA), nous ne pouvons pas consommer autant d'oxygène que nécessaire pour resynthétiser à un débit suffisant l'ATP, dont a besoin la contraction musculaire à ces

vitesse. Pourtant entre 90 et 100% de la vitesse maximale aérobie (entre la vitesse critique et VMA), $\dot{V}O_2$ augmente encore. De même, Zoladz et al., (27) ont démontré que la relation $\dot{V}O_2$ - vitesse dans cette zone de delta puissance (entre la vitesse critique et VMA) n'était plus linéaire. Ils décrivent alors un « $\dot{V}O_2$ excess », sorte d'inflation de la consommation d'oxygène (figure 3). En effet ils montrent que $\dot{V}O_2$ augmente de façon exponentielle entre la vitesse critique et VMA. Cette augmentation est interprétée comme étant le résultat de la « fatigue » musculaire (impossibilité de maintenir une puissance constante). Mécaniquement, la perte progressive de l'efficacité musculaire représentée par la composante lente de la $\dot{V}O_2$ est associée au développement de la fatigue et peut être compensée par des interventions qui améliorent la stabilité métabolique (12). Cette fatigue musculaire est-elle même le résultat de l'augmentation de l'Adénosine monophosphate, de l'Inosine monophosphate, des ions H^+ et de la baisse de la créatine phosphate avec augmentation de la créatine et des phosphates inorganiques dans le muscle. Tous ces phénomènes étant décrits comme ceux résultants de la fatigue musculaire (28).

L'ingestion de bicarbonate réduit l'ampleur de la composante lente, qui, selon Kolkhorst et al., (13) était le résultat d'une diminution de la fatigue. Cela confirme la théorie selon laquelle l'acidose métabolique est un facteur contribuant à la fatigue pendant l'exercice sévère.

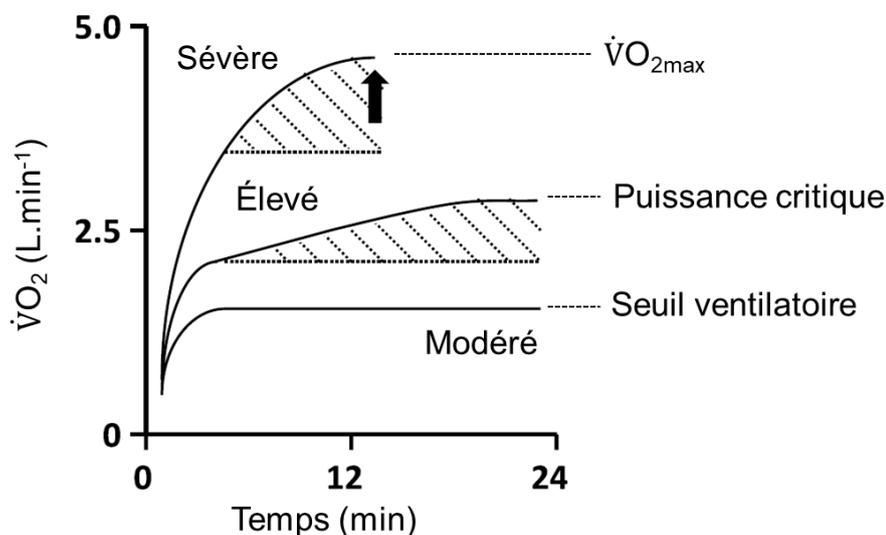


Figure 3 : Représentation schématique de la composante lente de $\dot{V}O_2$ lors d'exercice à puissance constante dans les domaines d'intensité modérée (< seuil ventilatoire), élevé (> seuil lactique et < puissance critique) et sévère (> puissance critique jusqu'à $\dot{V}O_{2max}$). La flèche indique le point d'épuisement pendant l'exercice sévère. Les zones hachurées désignent la composante lente $\dot{V}O_2$ qui augmente $\dot{V}O_2$ au-dessus de la valeur prévue pour une puissance à partir de la relation entre la $\dot{V}O_2$ – puissance (adapté de Jones et al., (12)).

Une autre conséquence de la composante lente de la $\dot{V}O_2$ mise en évidence dans l'étude d'Åstrand et Saltin (29) est que sa dérive jusqu'à $\dot{V}O_{2max}$ étend la gamme des vitesses auxquelles $\dot{V}O_{2max}$ peut être atteint, pourvu que l'exercice soit poursuivi jusqu'à épuisement ou au moins pendant une durée suffisante pour le développement intégral de la composante lente de $\dot{V}O_2$ (12). Cette propriété de l'exercice supérieur à la puissance critique a défini les extrémités du domaine de l'exercice sévère. Plus précisément, la puissance critique est la puissance la plus élevée (ou, plus exactement, le taux métabolique) (30) pour laquelle $\dot{V}O_2$ peut être stabilisé sous $\dot{V}O_{2max}$ (12,31). Par définition, tous les taux de travail à forte intensité (c.-à-d. > puissance critique) conduisent $\dot{V}O_2$ à $\dot{V}O_{2max}$. Au-delà de la limite supérieure du domaine sévère, ce qui a été qualifié d'extrême (26) est caractérisé comme un exercice si intense que l'épuisement intervient avant que la cinétique de $\dot{V}O_2$ ne permette d'atteindre $\dot{V}O_{2max}$ (12).

Pour conclure, à des intensités supérieures à la vitesse critique, l'intervention du métabolisme anaérobie est nécessaire pour fournir de l'énergie, c'est là que la composante lente rentre en jeu. Cela entraînera une augmentation de $\dot{V}O_2$ jusqu'à $\dot{V}O_{2max}$ (26,32). La puissance critique est donc la « limite basse » des exercices dont l'intensité est considérée comme sévère, provoquant obligatoirement une dérive de $\dot{V}O_2$ vers sa valeur maximale lorsque la puissance est constante (26,33).

1.3 Puissance constante et état stable maximal de la lactémie MLSS (Maximal Lactate Steady State)

Les études sur les protocoles à puissance constante se sont également intéressées à l'atteinte du plateau de la lactatémie. Dans les années 1900, l'énergie de l'Homme était dédiée au maintien d'un état stable garant de l'homéostasie, la fameuse constance du milieu intérieur, concept cher du grand physiologiste Français, Claude Bernard (3).

L'état stable de l'exercice « The steady state of Exercise » est le concept clef de la physiologie de la performance selon Hill (3, 15). Il décrit parfaitement l'augmentation du rejet de CO_2 (production de CO_2 mesurée $\dot{V}CO_2$) qui est contemporain de l'augmentation du lactate, à partir d'une certaine intensité d'exercice à laquelle $\dot{V}O_2$ augmente également, alors que la vitesse est stable. Pour autant, $\dot{V}CO_2$ augmente plus que $\dot{V}O_2$. Cela est dû au tamponnement des

ions H^+ libérés dans le muscle qui ne peuvent être totalement neutralisés par les ions bicarbonate HCO_3^- .

Pour Hill et Lupton (11), seuls les centres respiratoires du cerveau régulent l'acidose par le déclenchement de l'hyperventilation qui permet de rejeter l'excès de CO_2 . $\dot{V}CO_2$ augmente de façon disproportionnée par rapport à $\dot{V}O_2$ et le quotient respiratoire (QR) qui est le rapport entre $\dot{V}CO_2$ et $\dot{V}O_2$ devient supérieur à 1 (cette augmentation marquée du QR apparaît en moyenne autour de sa valeur de $0,95 \pm 5$ selon les personnes et leur sensibilité au $\dot{V}CO_2$).

Wasserman et Whipp (34) ont largement investigué le seuil ventilatoire et ont montré la contemporanéité de l'augmentation de la lactatémie et de l'hyperventilation pour rejeter le CO_2 produit par la réaction de tamponnement des ions H^+ par les ions bicarbonates HCO_3^- . Afin de vérifier que l'organisme soit en réel état stable physiologique, il faut que CO_2 soit stable, également pour témoigner que le potentiel hydrogène est également stable sur une longue durée et donc nécessaire à ce que les métabolismes anaérobies ne soient pas « inflationnistes ».

Le concept d'état stable de la lactatémie a été défendu par Londeree et Ames en 1975 (35) puis Lafontaine et al., en 1981 (36). Les protocoles rectangulaires (à puissance constante) permettent de considérer l'évolution de la lactatémie au cours du temps pour une puissance d'effort donnée (30, 31). Nagle et al., (39) avaient déjà considéré qu'il était nécessaire de mesurer la capacité à maintenir en équilibre des variables ventilatoires et métaboliques pendant un effort submaximal de moyenne et longue durée. A partir de trois paliers rectangulaires réalisés à des intensités de 70, 80 et 90% du $\dot{V}O_{2max}$ pour des durées respectives de 60, 40 et 30 minutes, ces auteurs ont constaté un état stable de la lactatémie pour une intensité d'effort égale à 77% du $\dot{V}O_{2max}$. A cet égard, un protocole rectangulaire à deux paliers de 20 minutes à 65 et 85% de $v\dot{V}O_{2max}$ ou VMA, séparés par 40 minutes de repos permet de cerner la puissance ou vitesse maximale d'état stable de la lactatémie (W_{CL}), vitesse (ou puissance) maximale d'exercice pour laquelle la lactatémie est encore constante au cours du temps (40). En effet, si l'on fait courir le sujet lors d'une épreuve par paliers de 4 min, à la vitesse pour laquelle on a remarqué une lactatémie égale à 4 mmol.L^{-1} , ou un début d'accumulation de lactate, on s'aperçoit qu'au bout de 10 minutes, cette valeur est largement supérieure à celle relevée lors du protocole triangulaire, l'exercice étant d'ailleurs interrompu rapidement (41). C'est pourquoi, afin de présumer de la capacité d'un coureur à soutenir une certaine fraction de $v\dot{V}O_{2max}$ (vitesse associée à $\dot{V}O_{2max}$) ou VMA (vitesse maximale aérobie) sur une durée supérieure à 10 minutes de course, il importe de le tester sur une épreuve de type rectangulaire, et d'une durée supérieure à dix minutes (38). Chassain (42), est l'initiateur de cette méthode qui permet en un seul test d'évaluer de façon

fiable cette vitesse maximale de course pour laquelle il est encore possible, après l'augmentation initiale du lactate sanguin, de stabiliser cette valeur au cours du temps (37). Mise à part la phase initiale de l'exercice, ces vitesses de course sont entièrement accomplies en aérobie, puisque les taux de production et d'utilisation (le "turnover") du lactate sont augmentés de façon égale et que la réutilisation du lactate ne peut s'opérer que via le métabolisme oxydatif. C'est pourquoi la détermination de la vitesse critique de non accumulation lactique n'est pas modifiée par la réalisation de deux paliers se succédant à 40 minutes d'intervalle. Or la notion de vitesse critique prend en compte la dimension temporelle de l'exercice.

Il est donc possible de déterminer précisément la vitesse pour laquelle :

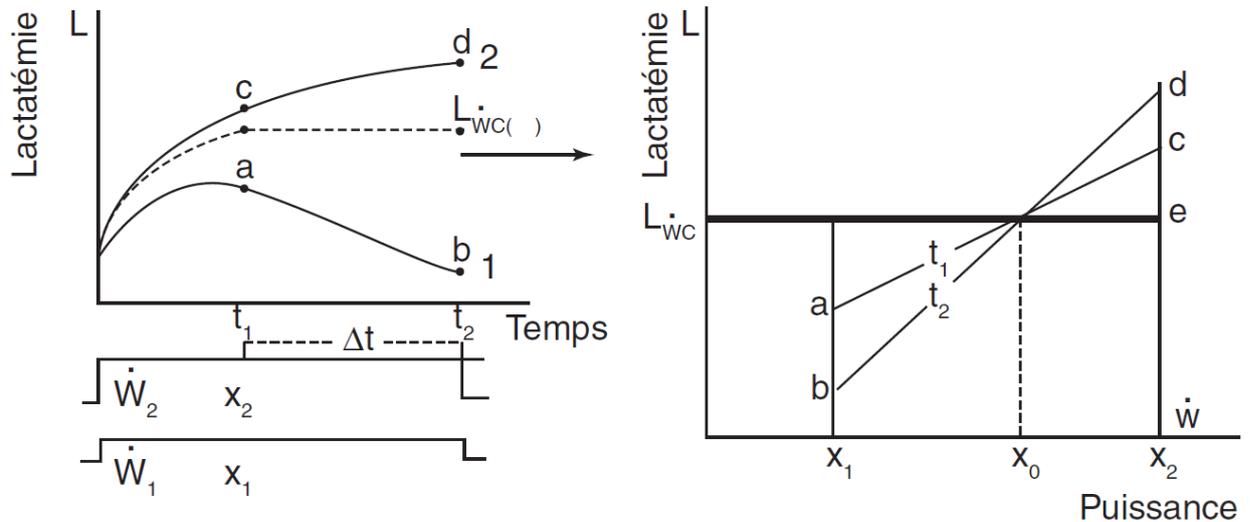
$$\Delta \text{lactate} / \Delta \text{temps} = 0 \quad \text{Eq. 3}$$

Équation 3 : Où, Δ est le delta entre le début de l'exercice et la fin de l'exercice.

On obtient alors deux évolutions de la lactatémie au cours du temps, selon que l'on se situe en-dessous (lors du premier palier) ou au-dessus (lors du second palier) de la vitesse au seuil lactique. La lactatémie (L_{WC}) stabilisée correspond à cette puissance ou vitesse critique comprise entre 2,2 et 6,7 mmol.L⁻¹ suivant les sportifs (40). L'état stable maximale de la lactatémie peut être aussi calculée très précisément grâce à l'expression des propriétés mathématiques du triangle rectangle (Figure 4 d'après Billat et al., (40)).

Ainsi, le niveau de clairance métabolique du lactate est un facteur important et fournit un moyen de description des interactions entre le niveau de métabolisation, la concentration sanguine du lactate et le flux sanguin. La métabolisation du lactate serait donc accrue par :

- Une accélération de la clairance du lactate sanguin par d'autres organes (cœur et foie) (43).
- Une clairance accrue par les muscles squelettiques inactifs (44).
- Une augmentation de la métabolisation du lactate produit par les fibres glycolytiques grâce aux fibres oxydatives (45).



avec $\dot{W}_2 > \dot{W}_1$

Détermination de $L_{\dot{W}_{CL}}$ par égalisation des deux relations « lactate-puissance » aux deux temps d'observation t_1 et t_2

$$x_0 = \dot{W}_{CL}; x_1 = \dot{W}_1; x_2 = \dot{W}_2 \quad (\dot{W} = \frac{W}{t} \text{ est une Puissance}); y_1 = \Delta L_1 (<0); y_2 = \Delta L_2 (>0)$$

$$a = L_1 t_1; b = L_1 t_2; c = L_2 t_1; d = L_2 t_2; e = L_{\dot{W}_{CL}}$$

$L_{\dot{W}_{CL}}$ (e) étant, par définition, la lactatémie (L) identique aux temps t_1 et t_2 quand la puissance d'exercice est égale à \dot{W}_{CL} , on peut écrire :

$$\frac{d-e}{e-b} = \frac{c-e}{e-a} \text{ en effectuant}$$

$$L_{\dot{W}_{CL}} = \frac{da-bc}{(d+a)-(c+b)} \quad \text{et} \quad \dot{W}_{CL} = \frac{x_1 y_2 - x_2 y_1}{y_2 - y_1}$$

pour $a = 4 \text{ mM}, b = 3 \text{ mM}, c = 4 \text{ mM}, d = 7 \text{ mM}$ mM = mmol/l

pour $x_1 = 12 \text{ km/h}, x_2 = 16 \text{ km/h}$

on aura $\dot{W}_{CL} = 13 \text{ km/h}$ et $LWC = 4 \text{ mM}$.

Figure 4 : Démonstration du calcul de l'état stable de la lactatémie. \dot{W}_{CL} : puissance ou vitesse maximale d'état stable de la lactatémie, $L_{\dot{W}_{CL}}$: lactatémie stabilisée à la puissance ou vitesse égale à \dot{W}_{CL} (d'après Billat et al., 1994, (40)).

Cependant, la principale critique méthodologique concerne l'hypothèse de la relation linéaire qui sous-tend le calcul de cette vitesse critique W_{CL} . En effet, le concept initial de la puissance critique (équation 4) se réfère à une relation linéaire et définie de :

$$P = W / t \quad \text{Eq. 4}$$

Équation 4 : Où P est la puissance de l'exercice (ici la vitesse), t est le temps et W est le travail (ici la distance puisque à une distance parcourue correspond une dépense d'énergie en joules par le temps).

Or cela n'est pas applicable à la relation entre la puissance de l'exercice et la lactatémie (46). En effet, celle-ci résulte à chaque instant de nombreux paramètres qui évoluent différemment au cours du temps.

La lactatémie dépend de la production de lactate par la cellule musculaire, de son transport dans le compartiment extracellulaire et, de sa consommation par divers organes. Au cours de l'exercice, la majeure partie (55 à 70%) du lactate serait réoxydée par les fibres musculaires de type I et les myocytes cardiaques. Cependant, le lactate peut être transporté par le sang efférent puis capté par le foie (et le rein), pour y être transformé en glucose qui peut être de nouveau utilisé par les muscles. Il s'agit du cycle de « Cori ». Les muscles squelettiques sont le siège d'une glycolyse importante (47). Le cœur est riche en isoenzyme H de la LDH ce qui lui permet d'utiliser le lactate comme substrat. Le métabolisme du lactate ne répond donc certainement pas à un simple modèle linéaire et le calcul de la puissance à la vitesse maximale d'état stable de la lactatémie (W_{CL}) ne garantit donc peut-être pas la détermination de l'état stable maximal de la lactatémie au cours du temps. Toutefois, il est préférable de sous-estimer la vitesse maximale d'état stable de la lactatémie par cette méthode (40), plutôt que de la surestimer par l'évaluation du seuil lactique par des protocoles triangulaires.

En fait, la lactatémie d'un exercice réalisé en état stable serait dépendante du lactate accumulé lors des premières minutes d'exercice (21) et cette valeur d'état stable peut être très élevée (cf. Figure 5). Le seuil anaérobie représente donc la valeur supérieure de la puissance d'effort soutenue en état d'équilibre (où $R_a = R_d$). L'entraînement réduit cette production de lactate dans les premières minutes de l'exercice sous maximal réalisé en état stable (48). De même un échauffement réalisé à 50% de $\dot{V}O_{2max}$ diminuerait la concentration de lactate précoce (49).

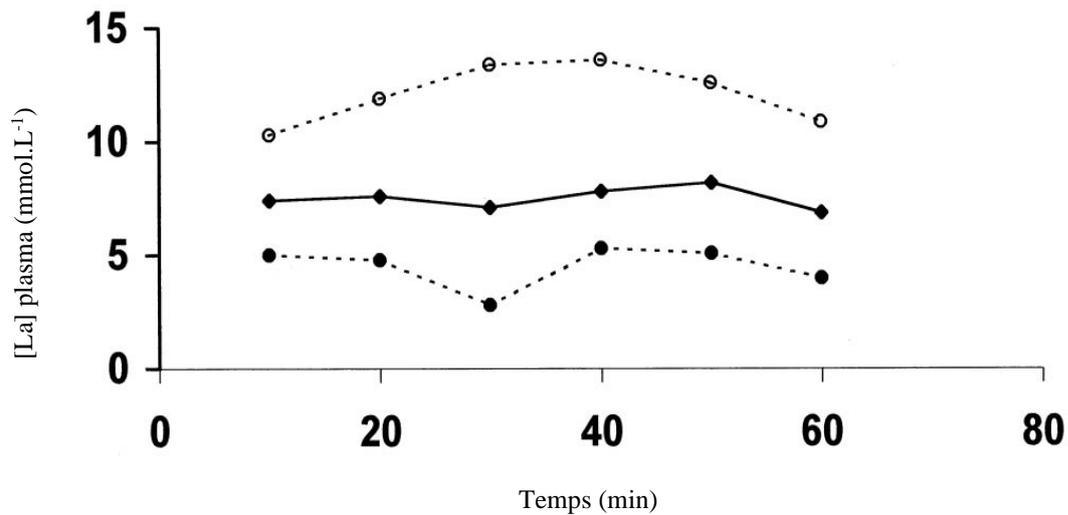


Figure 5 : Concentration moyenne de lactate plasmatique pour tous les sujets pour chaque point dans le temps (losanges pleins). Pour chaque point dans le temps, la figure représente également la concentration maximale de lactate plasmatique pour un seul sujet (cercles vides) et la concentration minimale de lactate plasmatique pour un seul sujet (cercles pleins), d'après Myburgh et al., (50).

En résumé, l'état maximal de lactate (MLSS) est défini comme le taux de lactate le plus élevé et constant de l'exercice. La concentration (MLSSc) et la puissance de travail (MLSSw) peuvent être maintenues au fil du temps sans accumulation continue de lactate dans le sang. Une relation étroite entre performances sportives d'endurance et MLSSw a été signalée (51) et la moyenne de la vitesse sur un marathon serait juste en dessous de MLSSw. Ce taux de travail délimite la « limite basse » des vitesses auxquelles les glucides contribuent à plus de 50% du besoin total d'énergie et la limite à partir de laquelle les lipides prédominent des glucides (51). Le taux d'adénosine métabolique et le taux de renouvellement de l'adénosine triphosphate (ATP) augmentent en fonction directe du pouvoir métabolique. Le lactate dans le sang au MLSS représente le point le plus élevé de l'équilibre entre l'apparition et la disparition du lactate. Cependant, la valeur de MLSSc a été signalée comme démontrant une grande variabilité entre les individus (de 2 à 8 mmol.L⁻¹) dans les capillaires sanguins et ne semble pas être lié à MLSSw (51).

1.4 Puissance constante et temps limite à $\dot{V}O_{2max}$ (plateau)

Le consensus principal est que la production d'oxygène est le facteur limitant de la performance. $\dot{V}O_{2max}$ est généralement associé à un exercice épuisant « sustained extreme physical exertion » (52). L'exercice est interrompu par le sujet qui ne peut plus supporter l'effort qui est généralement fixé à une puissance donnée. En effet, l'approche classique est la même que celle de Hill qui consistait à augmenter la puissance par paliers de puissance indépendants. En 1961, Åstrand et Saltin, avaient mis en évidence que $\dot{V}O_{2max}$ pouvait être atteint en passant du repos à une puissance d'exercice épuisant le sujet en moins de 3 minutes (Figure 6, d'après Åstrand et Saltin, (53)).

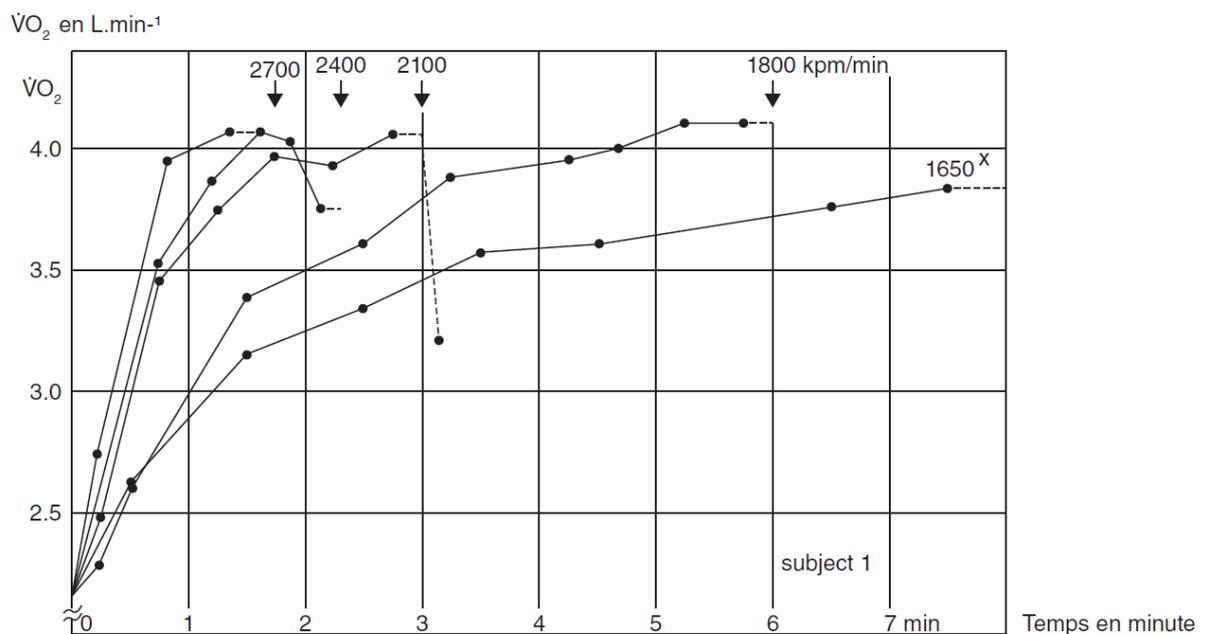


Figure 6 : Courbes individuelles montrant une augmentation de la consommation d'oxygène au début d'un exercice intense. Sur les courbes de 2400 et 2700 kpm/min (1 kilopond, kp, est la force agissant sur la masse de 1 kg à l'accélération normale de la pesanteur), on observe l'atteinte de $\dot{V}O_{2max}$ en moins de 3 minutes (Åstrand et Saltin, (53)).

Cet arrêt volontaire de l'exercice à $\dot{V}O_{2max}$ peut-être causé par la perception d'un symptôme pénible comme celui d'un grand essoufflement, de pénibilité voire même de douleurs musculaires ;

1. L'exercice doit être arrêté en raison d'une fatigue c'est-à-dire une incapacité à soutenir la puissance imposée, compte tenu d'une baisse de cadence et/ou de force musculaire,
2. L'effort ne peut être continué en raison d'une limitation de l'apport en oxygène et/ou de son utilisation au sein de la mitochondrie.

Jusqu'à la fin des années 90, la fonction cardiaque (fréquence cardiaque et volume d'éjection systolique dont le produit est le débit cardiaque) est considérée comme le principal responsable de la limitation de $\dot{V}O_{2\max}$. Ce qui est surprenant, c'est que l'on part du postulat que la fonction cardiaque est le facteur limitant en le posant expérimentalement comme un paramètre et un facteur. En effet, les chercheurs imposent des puissances (facteur responsable de l'arrêt) et ils étudient $\dot{V}O_{2\max}$ en conséquence. Ainsi la puissance est la variable indépendante (imposée par le protocole), tandis que débit cardiaque supposé limiter $\dot{V}O_2$ (Équation 4) et donc définir $\dot{V}O_{2\max}$ est la variable dépendante (mesurée) et non le facteur de l'expérimentation. On démontre qu'un facteur est limitant en lui faisant subir les effets d'un autre facteur limitant : celui de la puissance mécanique.

Wagner lui-même reconnaît que $\dot{V}O_{2\max}$ est « elusive » (52), c'est-à-dire insaisissable à la fois conceptuellement et expérimentalement sans avoir l'idée que justement la confusion vient du protocole expérimental lui-même. En effet, l'idée innovante, est d'étudier $\dot{V}O_{2\max}$ en l'imposant cette fois-ci comme variable de contrôle de l'intensité de l'exercice, c'est-à-dire que la vitesse (ou la puissance, variable dépendante) serait régulée en fonction du débit maximal de l'oxygène (variable indépendante). Cela, afin d'examiner les limites intrinsèques contenues dans l'équation de Fick (Équation 5) ; en effet, $\dot{V}O_{2\max}$ n'est qu'un point optimal à un instant donné de l'exercice, compte tenu de la force qui va déterminer la puissance des facteurs de l'équation de Fick. Pour augmenter $\dot{V}O_{2\max}$ pendant l'exercice, il faut donc augmenter la force pour pouvoir véritablement solliciter le débit cardiaque et la différence artérioveineuse à leur maximal :

$$\dot{V}O_2 = \dot{Q}_c \times (CaO_2 - CvO_2) \quad \text{Eq. 5}$$

Équation 5 : Où, $\dot{V}O_2$ est la consommation d'oxygène en $L \cdot \text{min}^{-1}$; \dot{Q}_c est le débit cardiaque en $L \cdot \text{min}^{-1}$; CaO_2 est le contenu artériel en oxygène en mL d' O_2 par 100 mL de sang (artériel) et CvO_2 est le contenu veineux en oxygène en mL d' O_2 par 100 mL de sang (veineux).

Les tentatives de calibration des durées d'intervalles de l'exercice tenant compte du temps limite à VMA étaient louables mais très discutables en raison des diverses techniques qui permettent d'établir la vitesse à $\dot{V}O_{2\max}$ ($v\dot{V}O_{2\max}$), puisque la moindre erreur pouvait induire

une valeur du temps limite du simple au double. Le début de dissociation du temps limite à VMA et à $\dot{V}O_{2max}$ était le début d'une ouverture sur la notion d'une possibilité de solliciter $\dot{V}O_{2max}$ à des vitesses ne permettant plus d'atteindre l'état stable de la lactatémie tout comme la vitesse de sprint.

La vitesse à $\dot{V}O_{2max}$ ($v\dot{V}O_{2max}$) a été utilisée pour déterminer le temps restant en effort maximal jusqu'à l'épuisement volontaire (Tlim) (54). Il s'agit d'un paramètre corrélé à la performance en course longue distance, comme les courses de 1500 à 5000 mètres, 10 kilomètres et 21 kilomètres (48, 49). La vitesse à $v\dot{V}O_{2max}$ et le Tlim ont tous deux été utilisés pour indiquer respectivement, la force aérobie et la capacité anaérobie afin de prescrire individuellement la durée, la quantité de stimuli dans la séance d'intervalle, ainsi que la performance des athlètes (57). Cependant, il est très difficile d'établir des comparaisons possibles des valeurs de Tlim, que ce soit entre les études ou autrement, en raison de la grande variabilité des protocoles d'entraînement et du niveau d'entraînement des individus (57).

Par ailleurs, si cette vitesse n'est pas affectée par le protocole, la relation vitesse-Tlim étant exponentielle (58) ou hyperbolique (3, 18), une erreur non significative de $v\dot{V}O_{2max}$ pourrait affecter une différence significative de la valeur du Tlim. De plus, d'après l'étude de Renoux et al., (59), les résultats révèlent que le déficit en oxygène était lié au temps d'épuisement à la vitesse maximale aérobie et indiquent que plus le déficit en oxygène est important, plus le temps jusqu'à l'épuisement est long à vitesse maximale aérobie. Il a également été noté que l'ajustement de la consommation d'oxygène est lié au déficit en oxygène. En d'autres termes, les sujets qui ont une capacité anaérobie importante sont les plus efficaces pendant un temps d'exercice jusqu'à l'épuisement à vitesse maximale aérobie. Les valeurs de temps limites peuvent être exprimées par une régression linéaire (Équation 6) faisant intervenir vitesse maximale aérobie et capacité anaérobie (59). Cette conclusion pourrait être d'un grand intérêt pour l'entraînement des coureurs de demi-fond.

La régression linéaire est définie comme (59) :

$$Tlim = - 43,841 VMA + 7,276 DO_2 + 977,12 \quad \text{Eq. 6}$$

Équation 6 : Où, VMA (vitesse maximale aérobie) est exprimée en $km \cdot h^{-1}$ et DO_2 est le déficit en oxygène exprimé en $mLO_2 \cdot kg^{-1}$.

Billat et al., (60) ont inversé la situation expérimentale en imposant $\dot{V}O_{2max}$ comme facteur constant de contrôle et ont mesuré la puissance permettant de repousser le temps limite à $\dot{V}O_{2max}$ pour ensuite dépasser $\dot{V}O_{2max}$. Le test classique de temps limite à la puissance de $\dot{V}O_{2max}$ est un test d'endurance exhaustif durant lequel la puissance est fixée à $P\dot{V}O_{2max}$ (puissance associée à $\dot{V}O_{2max}$). Après un échauffement de 15 minutes à 50 % $P\dot{V}O_{2max}$ puis une période de 5 minutes de repos durant laquelle le $\dot{V}O_2$ retrouve sa valeur basale, il est demandé au sujet de fournir un effort continu durant lequel la puissance est égale à $P\dot{V}O_{2max}$ (préalablement mesurée durant un test incrémenté). Le test s'arrête lorsque que le sujet n'est plus capable de continuer son effort ou qu'il n'arrive plus à maintenir la cadence de pédalage demandée. Durant ce test, on peut déterminer le temps limite (T_{lim}) ou temps total du test correspondant à la somme du temps d'atteinte du $\dot{V}O_{2max}$ (T_{att}) et du temps de maintien du $\dot{V}O_{2max}$ ($T_{lim@}\dot{V}O_{2max}$).

La durée du plateau du $P\dot{V}O_{2max}$ est calculée comme le temps durant lequel le $\dot{V}O_2 > 95$ % $P\dot{V}O_{2max}$, en accord avec la variabilité expérimentale, biologique intra-individuelle. Le temps minimum considéré pour accepter l'existence d'un plateau du $\dot{V}O_{2max}$ est de 1 minute.

Billat et al., (60) ont donc démontré que la moyenne de puissance durant le plateau de $\dot{V}O_{2max}$ est significativement plus basse durant le temps limite à charge variable que durant le temps limite à $P\dot{V}O_{2max}$ ($p < 0.0001$). Ils en concluent que la variation de puissance est ainsi un facteur limitant de l'endurance à $\dot{V}O_{2max}$ et que l'exercice contrôlé par le maintien de $\dot{V}O_2$ à sa valeur maximale permet de reculer l'arrêt de l'exercice. Ce nouveau protocole à charge variable démontre que l'endurance au $\dot{V}O_{2max}$ peut être supérieure à 15 min pour la plupart des sujets indépendamment de leur valeur du $\dot{V}O_{2max}$.

Il est temps de se libérer du paradigme de la vitesse constante et du temps limite. Ainsi, ces protocoles à puissance constante ont mis en évidence des zones de stabilité physiologique symptomatique d'un maintien de l'homéostasie de l'organisme à l'effort. Cependant, devant la lourdeur de tels protocoles, les physiologistes de l'exercice et médecins cardiologues, ont opté pour des protocoles à puissance variables de type incrémenté.

2 Protocoles à puissance variable

2.1 Test de Puissance incrémentée dit tests triangulaires et plateau de $\dot{V}O_{2max}$

Le « no limit » ne s'applique pas à $\dot{V}O_2$ et il existe bien un $\dot{V}O_{2max}$ qui peut être observé expérimentalement. Mais les chercheurs ne sont pas en accord sur ce fait, de multiples définitions

des critères d'atteinte de $\dot{V}O_{2max}$ se conjuguent. Bien que Hill en 1927, n'ait pas cherché à aller au-delà de 16 km.h⁻¹, il est admis qu'il faut observer un plafonnement de $\dot{V}O_2$ en dépit d'une augmentation de la vitesse et/ou puissance de l'exercice. Dans le cas contraire on parle de valeur « pic » qui suppose une valeur maximale incontournable quel que soit le protocole d'exercice. On s'attend donc à un plateau de $\dot{V}O_{2max}$ à partir de la Vitesse Maximale Aérobie (VMA) ou vitesse associée à $\dot{V}O_{2max}$ ($v\dot{V}O_{2max}$) mais ce n'est pas toujours le cas (Figure 7, d'après Howley et al., (61)).

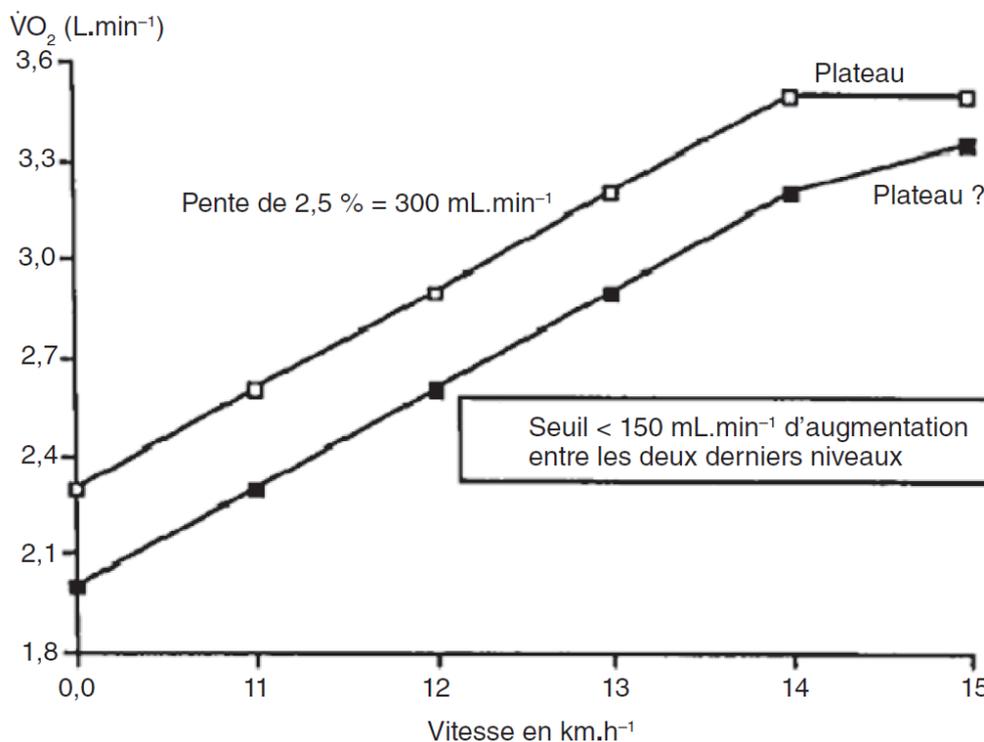


Figure 7 : Cinétique de $\dot{V}O_2$ durant un test incrémenté pour deux sujets représentatifs ayant tous les deux validés des critères secondaires d'atteintes de $\dot{V}O_{2max}$. L'un deux (carré blanc) démontre un plateau de $\dot{V}O_{2max}$. A l'inverse, le second (carré noir) ne démontre pas de plateau de $\dot{V}O_{2max}$ (d'après Howley et al., (61)).

Afin de tenter de s'accorder sur la définition de l'atteinte de $\dot{V}O_{2max}$, la recherche de protocoles efficaces pour mesurer de façon certaine $\dot{V}O_{2max}$ s'accroît. Les premiers auteurs à instaurer un protocole à puissance (vitesse) progressivement augmentée durant lequel le $\dot{V}O_2$, la fréquence cardiaque, la ventilation et la cinétique lactique seront mesurés sont Taylor et al., (62). Ce sont ces mêmes auteurs qui ont considéré que la quantité de masse musculaire sollicitée

durant l'exercice et l'échauffement jouait un rôle dans la cinétique de l'oxygène. C'est à partir de cette époque que $\dot{V}O_2$ pourra être rapporté à la masse du sujet.

Actuellement, les protocoles, dit incrémentés ou triangulaires, durant lesquels la puissance de l'exercice est progressivement augmentée restent les référents pour étudier l'atteinte de $\dot{V}O_{2max}$ et les valeurs physiologiques associées. Ces tests se déroulent souvent sur des ergomètres. La puissance étant augmentée sur ergocycle alors que sur tapis, le choix de l'augmentation de la pente ou de la vitesse est utilisé. Il existe toujours deux façons d'accroître la puissance. La première rend compte d'une augmentation de la puissance par palier, par exemple 1 km.h⁻¹ toutes les 3 min. La seconde méthode, revient à augmenter en continu la puissance, ce type de protocole est nommé protocole en « rampe », par exemple, 20W/min (63).

Dans le premier type, les tests incrémentés par paliers, l'expérimentateur choisi la durée des paliers et l'incrément. Ils permettent donc de multiples ajustements afin d'individualiser les protocoles. L'expérimentateur peut paramétrer la puissance de départ, des phases de repos entre chaque palier et la longueur (temps) des paliers permettant ainsi de définir des états stables physiologiques à la fin de chaque palier. Très vite de multiples tests se succèdent et s'accumulent, dès lors, des études de comparaison de protocoles vont être mises en place afin de déterminer les protocoles les plus efficaces (64). Les résultats indiqueront que même si la reproductibilité de ces protocoles est valide, $\dot{V}O_{2max}$ est protocole dépendant. A l'approche des années 2000, l'influence du protocole sur la détermination de $\dot{V}O_{2max}$ ne peut être que prise en compte (65), et l'ajout d'autres valeurs physiologiques comme notamment la vitesse maximale aérobie, les vitesses au seuils lactiques et les seuils ventilatoires seront prises en compte dans la recherche de la performance.

Le second type, les protocoles en rampe, se développeront dans les années 1980, où Whipp et al., (66) développent un protocole phare qui reflète bien le métabolisme aérobie et de ce fait l'atteinte de la consommation maximale d'oxygène. Comme pour les tests par paliers, les chercheurs furent amenés à trouver le protocole le plus efficace visant toujours la détermination de $\dot{V}O_{2max}$.

Le plateau de $\dot{V}O_2$ représente une stabilisation du débit cardiaque (\dot{Q}_c) et de la différence artérioveineuse qui peut être remarquée vers la fin du test incrémenté. Il convient de souligner que $\dot{V}O_{2max}$ n'est pas équivalent à la performance sportive qui est le temps nécessaire pour parcourir une distance spécifique dans des conditions de compétition. Il s'agit plutôt d'une caractéristique physiologique limitée par les limites paramétriques des équations 7 et 8 de Fick :

$$\dot{V}O_2 \text{ (mL.min}^{-1}\text{)} = \dot{Q}_c \times [CaO_2 - CvO_2] \quad \text{Eq. 7}$$

Et

$$\dot{Q}_c \text{ (mL/min)} = FC \text{ (bpm)} \times VES \text{ (mL.battements}^{-1}\text{)} \quad \text{Eq. 8}$$

Équation 7 et **Équation 8** : Où, bt ; battements par minute, FC ; fréquence cardiaque en battements par minute, VES ; le volume d'éjection systolique en mL par battement, et $[CaO_2 - CvO_2]$ en mL est la différence artérioveineuse.

Etant donnée que la consommation d'oxygène n'arrive pas à suivre la demande croissante d'oxygène, l'organisme a de plus en plus recours à des voies indépendantes de l'oxygène comme la glycolyse anaérobie. L'importance du plateau de $\dot{V}O_2$ a souvent été mal interprétée. En 1988, il a été suggéré que l'absence de plateau pour certaines personnes signifiait que $\dot{V}O_{2max}$ n'était pas limité par le système cardiovasculaire. Cela suggèrerait que les facteurs musculaires pourraient être importants dans la limitation de $\dot{V}O_{2max}$. Cependant, comme cela a été mis en évidence, le plateau de $\dot{V}O_2$ n'est pas la principale « preuve » d'une limitation cardiovasculaire. Les facteurs physiologiques qui pourraient limiter $\dot{V}O_{2max}$ sont : 1) la capacité de diffusion pulmonaire, 2) le débit cardiaque maximal, 3) la capacité du sang à transporter l'oxygène et 4) les caractéristiques des muscles squelettiques (67).

La vision « classique » de la consommation maximale d'oxygène est que les taux maximaux d'utilisation de l'oxygène (et des taux durables de production d'ATP) dans le muscle squelettique sont limités dans la plupart des circonstances par la capacité du cœur à fournir de l'oxygène au muscle travaillant et à s'y adapter (68,69).

Selon Astorino et al., (70), les données montrent qu'un plateau à $\dot{V}O_{2max}$ est un phénomène réel, et sa présence est avant tout une question méthodologique et non physiologique. Le critère principal pour obtenir un « vrai » $\dot{V}O_{2max}$ est une augmentation faible ou nulle de $\dot{V}O_2$ malgré une augmentation de l'intensité de l'exercice. Taylor et al., (62) ont d'abord signalé l'utilisation d'un plateau et l'ont défini comme une augmentation de $\dot{V}O_2$ inférieure à 150 mL.min⁻¹ en réponse à une augmentation de l'inclinaison du tapis roulant de 2,5% à 7 miles.h⁻¹. Ce critère a été déterminé en réduisant de moitié l'augmentation moyenne de $\dot{V}O_2$ par incrément pour tous les participants. Un large éventail de valeurs a depuis été utilisé pour déterminer si les critères de plateau ont été satisfaits, une grande majorité de chercheurs n'ayant même pas signalé leurs critères de plateau (71). Typiquement, diverses valeurs arbitraires de variation de $\dot{V}O_2$ (72)

allant de <50 à <280 mL.min⁻¹ (55, 66) ont été utilisées comme critères d'acceptation pour l'existence d'un plateau.

Les protocoles triangulaires et en rampe ont mis en évidence que l'occurrence du plafonnement de $\dot{V}O_2$ au maximum n'était que de 50%. En effet seulement 50% des sujets présentaient un plateau de $\dot{V}O_{2max}$ au terme de ce type de protocole incrémenté. Cependant, tout un débat s'est engagé concernant la possibilité que les sujets « non plafonneurs » avaient tout de même atteints leur $\dot{V}O_{2max}$. Il fut alors prescrit de le vérifier par l'atteinte de critères dits secondaires. C'est notamment, pour ces raisons que le plateau de $\dot{V}O_{2max}$ ne peut pas être utilisé comme le seul critère d'atteinte de $\dot{V}O_{2max}$. Bien que la détection d'un plateau dans l'exercice primaire soit toujours préférable, et que les expérimentateurs devraient essayer de choisir la meilleure méthodologie pour augmenter la valeur probable d'un plateau détecté, cela n'est pas toujours possible. En tant que tel, cela justifierait l'utilisation d'un test secondaire ou de critères supplémentaires pour vérifier qu'un effort maximal, et donc un « vrai » $\dot{V}O_{2max}$, a probablement été atteint en l'absence de plateau de $\dot{V}O_2$. Il a donc été recommandé d'appliquer les critères secondaires afin de vérifier que l'effort est maximal (69).

Aujourd'hui l'American College of Sport Medicine (ACSM), recommande l'utilisation de critères secondaires lorsqu'un effort maximal dit être enregistré mais que la question de la « vraie » atteinte du $\dot{V}O_{2max}$ se pose.

Les critères secondaires établis par la communauté scientifique (74–76) sont :

1. Un quotient respiratoire QR ($\dot{V}CO_2/\dot{V}O_2$) $\geq 1,1$
2. Une fréquence cardiaque maximale atteinte égale ou supérieure à 90% de la fréquence cardiaque maximale théorique prédite s'appuyant sur l'âge du sujet
3. La concentration de lactate sanguin [La] ≥ 8 mM
4. Et plus récemment, RPE (Ratings of Perceived Exertion de Borg, 1970) ≥ 17

Mais les critiques restent toujours présentes car, la variabilité inter-sujets peut jouer un grand rôle sur l'accomplissement des critères et de ce fait inclure ou exclure des sujets à tort (63). Sur ce « conflit » permanent de l'atteinte d'un $\dot{V}O_{2max}$ lors d'un effort supposé maximal, est née la recommandation d'utiliser des tests (encore appelés ; phases ou étapes) de vérification pour une approbation par les pairs du fameux $\dot{V}O_{2max}$ (77–82). Comme le décrit Schaun en 2017,

l'objectif n'est pas seulement d'atteindre un $\dot{V}O_{2max}$ similaire à celui du test incrémenté mais de chercher à obtenir un $\dot{V}O_2$ encore plus élevé (83).

La phase de vérification consiste donc à demander au participant d'évoluer à une puissance de travail d'un niveau supérieur au dernier palier retenu comme celui déterminant $\dot{V}O_{2max}$ lors du test triangulaire. Cette étape de vérification avait été suggérée et étudiée pendant près de 30 ans (72) mais peu d'études appliquèrent cette méthode. Ce n'est que récemment que la phase de vérification a été établie, d'ailleurs, les accords sur l'intensité et l'intervalle de repos entre celle-ci et le test incrémenté sont toujours discutés. Outre la prise en compte de l'intensité et de la période de récupération, des critères ont là aussi été mis en œuvre pour confirmer l'atteinte d'un « vrai » $\dot{V}O_{2max}$. Sur la base du coefficient de variation intra-sujets, plusieurs études ont utilisé un seuil de 3% permettant de confirmer le test incrémental de $\dot{V}O_{2max}$ chez des sujets sains, actifs et entraînés (83).

Dans ces protocoles triangulaires, la consommation d'oxygène sous maximale a également été une variable d'intérêt se révélant être un facteur discriminant de la performance, symptomatique du rendement énergétique de la course notamment. On définit alors les concepts d'économie de course et de coût énergétique.

2.2 Test de Puissance incrémentée dit tests triangulaires, économie de course et coût énergétique pour calculer $v\dot{V}O_{2max}$

L'efficacité mécanique est le rapport entre l'énergie du travail effectué et l'énergie totale dépensée. L'expression économie de course est utilisée pour exprimer la consommation d'oxygène nécessaire pour courir à une vitesse donnée, elle reflète la demande en énergie de courir à une vitesse sous-maximale constante (84–87). Cela peut être démontré en traçant la courbe de la consommation d'oxygène en fonction de la vitesse de course. Cette notion se différencie du coût énergétique (CE), qui est l'énergie requise par unité de masse corporelle pour parcourir une distance donnée. Les coureurs les plus économes consomment moins d'oxygène que les coureurs ayant une faible économie de course à la même vitesse (Figure 8) (78, 81). D'ailleurs l'économie de course expliquerait une partie de la variabilité des performances chez les sujets présentant des valeurs de $\dot{V}O_{2max}$ similaires selon Bassett et al., (67).

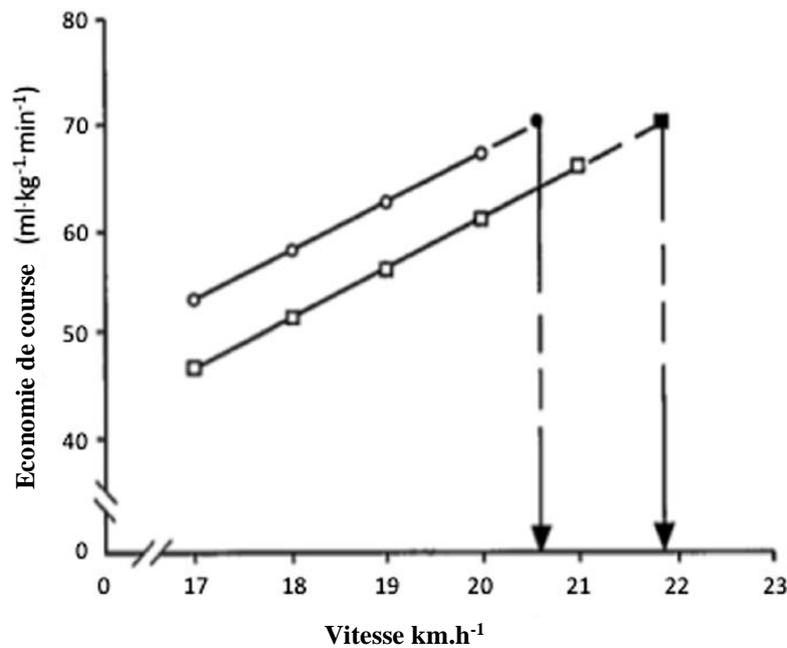


Figure 8 : Une ligne a été tracée à travers la série de points utilisés pour construire une ligne d'économie de course et a été extrapolée selon le $\dot{V}O_{2max}$ du sujet sur tapis roulant. Une ligne perpendiculaire a ensuite été tracée entre la valeur de $\dot{V}O_{2max}$ et l'axe des x afin d'estimer la vitesse que le sujet aurait atteinte à $\dot{V}O_{2max}$. Ceci est une estimation de la vitesse maximale qui peut être maintenue par phosphorylation oxydative (d'après Barnes et Kilding, (85)).

Une des meilleures descriptions de la manière dont $\dot{V}O_{2max}$ et l'économie de course interagissent pour influencer sur la vitesse de course a été fournie par Daniels (89) dans sa description et définition principes de la « vitesse à $\dot{V}O_{2max}$ » ($v\dot{V}O_{2max}$). La Figure 9 montre un graphique avec des coureurs masculins et féminins égaux en termes de $\dot{V}O_{2max}$, mais différents en termes d'économie de course (90). Dans cet exemple, la différence d'économie de course a entraîné une nette différence de vitesse pouvant être atteinte si cette course était courue à $\dot{V}O_{2max}$. De la même manière, la figure 10 montre l'impact d'une différence de $\dot{V}O_{2max}$ sur la vitesse à $\dot{V}O_{2max}$ ($v\dot{V}O_{2max}$) dans des groupes ayant des valeurs d'économie de course similaires.

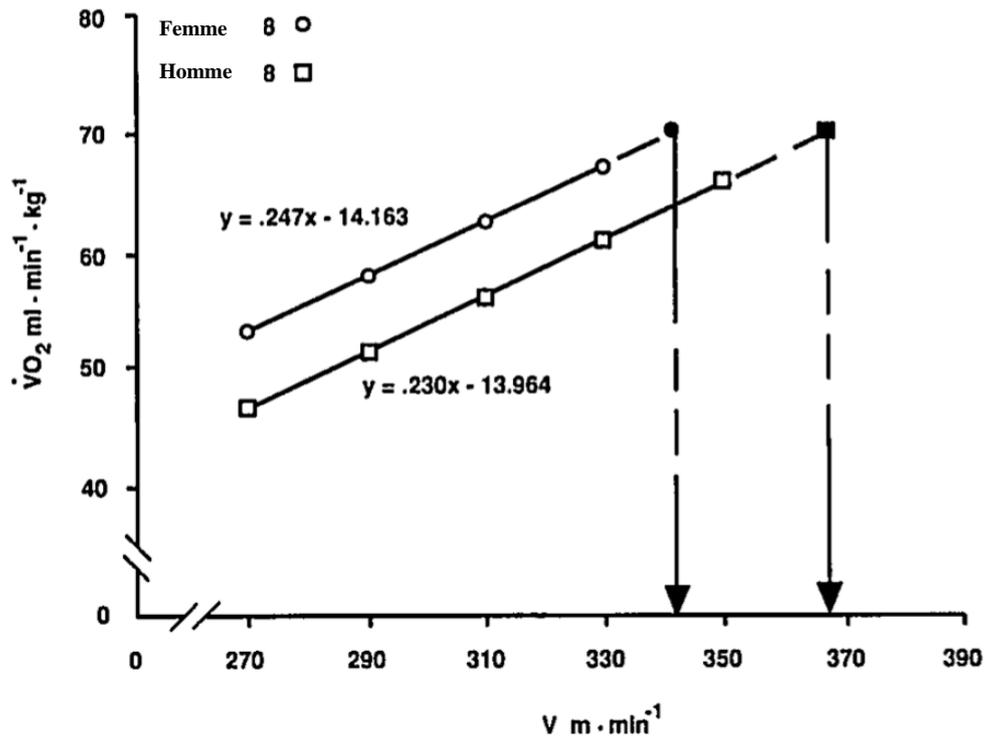


Figure 9 : Comparaison de coureurs hommes et femmes sur tapis roulant à $\dot{V}O_{2max}$ égaux en fonction de la vitesse de course en $m \cdot min^{-1}$. Les hommes sont nettement favorisés en économie de course et en $v\dot{V}O_{2max}$ ($P < 0.05$, d'après Daniels, (90)).

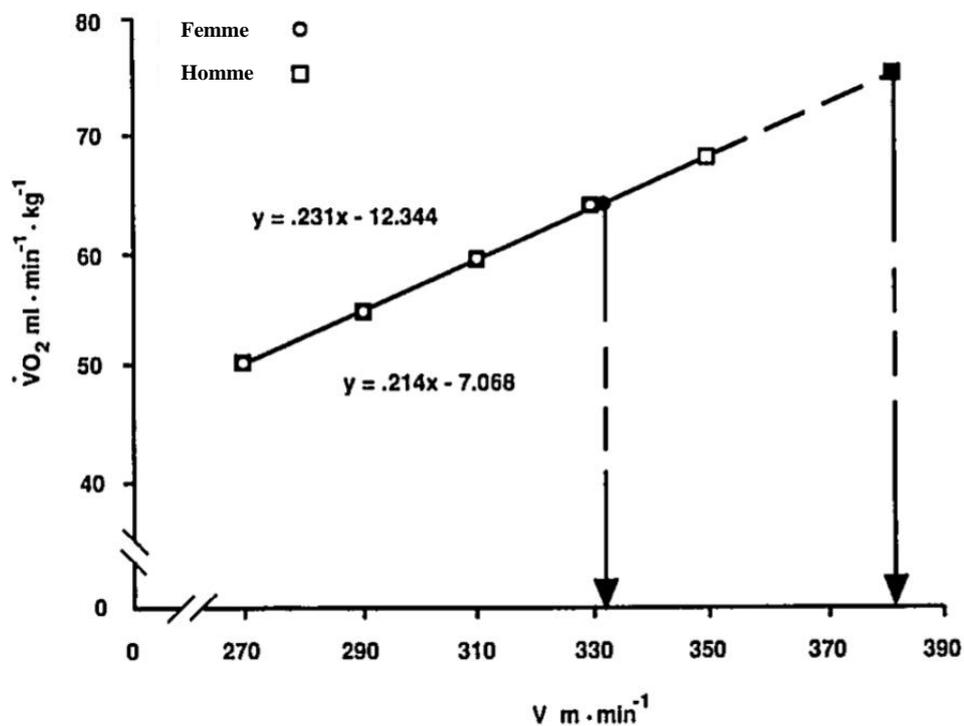


Figure 10 : comparaison de coureurs et de coureuses sur tapis roulant à économie de course égale. Les carrés et les ronds se confondent jusqu'à $330 m \cdot min^{-1}$ (90).

Cependant, comme les courses ne se déroulent pas à $\dot{V}O_{2max}$, la capacité de l'athlète à courir à un pourcentage élevé de $\dot{V}O_{2max}$ améliore significativement les performances de course (91).

Par ailleurs, une autre forme de relation vitesse- $\dot{V}O_{2max}$ est le coût énergétique qui permet d'évaluer la performance de l'athlète. Le coût énergétique se définissant alors comme l'énergie requise par unité de masse corporelle pour parcourir une distance donnée et s'exprime en $mL.kg^{-1}.m^{-1}$. Il fut préconisé par Lacour et al., (92) que les paliers des tests triangulaires devaient alors être au moins de 4 minutes pour prétendre pouvoir en déduire le coût énergétique et définir la vitesse associée à $\dot{V}O_{2max}$ ($v\dot{V}O_{2max}$) (7,92). Selon l'équation de di Prampero (7) la vitesse associée à $\dot{V}O_{2max}$ ($v\dot{V}O_{2max}$) se calcule ainsi :

$$v\dot{V}O_{2max} = \dot{V}O_{2max} / CE \quad \text{Eq. 9}$$

Équation 9 : Où, $v\dot{V}O_{2max}$ est la vitesse associée à $\dot{V}O_{2max}$ ($m.min^{-1}$), $\dot{V}O_{2max}$ est la consommation maximale en oxygène ($mL.kg^{-1}.min^{-1}$) et CE, le coût énergétique ($mL.kg^{-1}.m^{-1}$).

La vitesse associée à $\dot{V}O_{2max}$ ($v\dot{V}O_{2max}$) peut donc se calculer grâce à l'équation de di Prampero lorsque l'évaluation se fait en laboratoire sur tapis roulant avec une mesure des échanges gazeux. Toutefois, sur le terrain, il est également possible d'obtenir une $v\dot{V}O_{2max}$ avec mais aussi sans mesure d'échanges gazeux. Lacour et al.,(92) ont étudié les différentes façons d'évaluer la vitesse de course à laquelle l'absorption maximale d'oxygène se produit entre une protocole sur tapis roulant et un protocole sur piste. Ils en ont conclu que l'un ou l'autre de ces tests peut être utilisé pour mesurer la $v\dot{V}O_{2max}$ et que le test de terrain doit être préféré si le sujet est évalué à des fins d'entraînement (92). Par contre, Iaiche et al., (93) montrent que les vitesses maximales atteintes en laboratoire (sur tapis roulant) sont significativement supérieures ($p<0,001$) aux $v\dot{V}O_{2max}$ obtenues sur le terrain, pour un même protocole. Ils attribuent cette différence de vitesse aux facteurs aérodynamiques inexistantes lors de la course sur tapis roulant et aux conditions climatiques rencontrées sur le terrain.

En effet, plusieurs équipes de recherche s'accordent à dire qu'il n'y a pas de différences de vitesse entre les vitesses maximales sur piste et les vitesses maximales sur tapis roulant avec une pente à 1% ou 3% (94). Dans ces études, la pente du tapis roulant est destinée à opposer une résistance de substitution aux conditions des tests de terrain. Une modalité de course progressive, continue et maximale sous forme de course navette de 20 mètres a également été proposée pour estimer le $\dot{V}O_{2max}$ (90, 91). Il s'agit, lors de ce test, de courir en aller-retour entre deux lignes séparées de 20 mètres. Ce test présente l'avantage de pouvoir être réalisé en salle, permettant de

s'affranchir des contraintes climatiques. Cependant, la vitesse maximale atteinte à la fin de cette épreuve s'est avérée inférieure à la vitesse mesurée lors d'un test en course sur piste (97). Ces différences de vitesses maximales semblent s'expliquer par la modalité de course en navette qui impose des accélérations, des décélérations et de brusques changements de direction. Une synthèse des travaux (98) sur ce sujet a montré que la différence de vitesse était significative au-delà de 10-11 km.h⁻¹. Pour les sujets dont la vitesse maximale en course navette est supérieure à 11 km.h⁻¹, il est possible de prédire $v\dot{V}O_{2max}$ (ou VMA) à l'aide de l'équation 10 (98) :

$$VMA = -8,18 + 1,82 \times \text{vitesse du test navette} \quad \text{Eq. 10}$$

Équation 10 : Où, VMA est la vitesse maximale aérobie (km.h⁻¹)

Si l'objectif de l'évaluation est uniquement de connaître la $v\dot{V}O_{2max}$ des sujets, le Test de Terrain de l'Université de Montréal (UMTT) semble être le plus adapté (99). En effet, ce test s'est avéré valide pour mesurer cette vitesse et le type d'exercice proposé est comparable à l'effort de compétition puisqu'il est réalisé sur piste. Par contre, si les mesures du $\dot{V}O_{2max}$ et du coût énergétique sont recherchées, nous distinguerons les protocoles qui conduisent à mesurer une vitesse à partir de paramètres strictement aérobie (88, 95, 96) et ceux qui permettent de mesurer une vitesse incluant une composante anaérobie (85, 94) et qui, comme le signalent Hill et Rowell (103), reflètent mieux l'effort de course sur le terrain.

Par ailleurs, Petot et al., (33) ont démontré qu'en variant la vitesse ou la puissance à la fin d'un test incrémenté sur ergocycle, $\dot{V}O_2$ augmente au-delà du $\dot{V}O_{2max}$ obtenu. Avec la poursuite de l'augmentation de la vitesse, $\dot{V}O_2$ continue de croître ou tout au moins la durée du plateau à $\dot{V}O_{2max}$ peut être maintenue jusqu'à 25 minutes pour certains sujets (33,60).

Nous avons vu que le concept de vitesse associée au $\dot{V}O_{2max}$ est apparu au début des années quatre-vingt avec Daniels (89) et di Prampero (7) et que la vitesse aérobie maximale sur le terrain est apparue avec le test de piste de Montréal de Léger et Boucher (99). Le test de Léger et Boucher permettait d'avoir une estimation de $\dot{V}O_{2max}$ (avec un coût énergétique moyen de la course) et fournissait la vitesse minimale sollicitant $\dot{V}O_{2max}$ dans un test incrémental. Cependant, Karlsson et al., (104) avait déjà montré en 1967 que la vitesse des coureurs lors d'une course épuisant le sujet en 4 minutes pouvait être réduite à 80% (-3 km.h⁻¹), sans réduire leur consommation en oxygène.

A présent, nous considérons en croisant les repères de vitesse à $\dot{V}O_{2max}$ et de vitesse à l'état d'équilibre maximal du lactate sanguin (MLSS), que la vitesse minimale sollicitant $\dot{V}O_{2max}$

est inférieure à $v\dot{V}O_{2max}$ lorsque le protocole de temps limite est utilisé plutôt que l'incrémenté classique. Cette vitesse à $\dot{V}O_{2max}$ selon le protocole de temps limite entre 90 et 140% de $v\dot{V}O_{2max}$ (105) se situe entre $vMLSS$ et $v\dot{V}O_{2max}$ (vitesse dite $v\Delta 50$, c'est-à-dire à 50% de la différence).

Les termes $v\dot{V}O_{2max}$ et V_{max} (vitesse maximale) sont souvent utilisés de manière interchangeable. Cependant, la différence entre les deux est faible mais significative. V_{max} est la vitesse maximale [ou pic, appelée V_{peak}] obtenue lors d'un test sur tapis roulant (106), et n'est donc pas directement associée à $\dot{V}O_{2max}$. V_{max} est souvent calculé comme la vitesse maximale maintenue pendant 30 à 60 secondes à la fin du test (101, 102). De nombreuses études ont montré que V_{max} était fortement corrélé aux performances de course sur des distances allant de 3 à 16 km ($r = 0,83$ à $0,97$) (108–110).

Les conclusions de ces études furent que l'apport de l'oxygène au tissu est un facteur limitant de $\dot{V}O_{2max}$. Il est donc en théorie possible d'observer un plafonnement de $\dot{V}O_2$ à sa valeur maximale ($\dot{V}O_{2max}$) chez chacun d'entre nous à condition de tolérer la puissance d'exercice suffisamment longtemps pour observer un plateau.

2.3 Les tests en puissance augmentée par paliers et en rampe ayant permis de déterminer les seuils ventilatoires et lactiques

Les seuils ventilatoires étaient plutôt utilisés pour diagnostiquer une pathologie cardiorespiratoire dans les années 70-80. Dans le domaine de l'activité physique, ils étaient considérés comme très proches des seuils lactiques sans l'inconvénient du prélèvement sanguin, mais nécessitant en revanche, la mesure des échanges gazeux. En effet, le seuil ventilatoire permet de repérer de façon non-invasive, le seuil de vitesse à partir duquel le métabolisme anaérobie participe de façon croissante au renouvellement de l'ATP lors d'un protocole d'exercice en rampe. Aujourd'hui, il existe autant de seuils anaérobies que de protocoles de test et de définitions. Ils sont soit ventilatoire, soit lactique en utilisant directement la mesure de la concentration sanguine en acide lactique.

Le plus simple est celui de la détermination d'un seuil aérobie et anaérobie correspondant à deux points d'inflexion sur la courbe qui détermine la concentration de lactate sanguin en

fonction du $\% \dot{V}O_{2max}$ lors d'un test incrémenté, remarquables d'un point de vue statistique, calculés alors sur une centaine d'individus (Figure 11) :

- la première valeur, égale à une lactatémie de 2 mmol.L^{-1} , est identifiée comme étant le « seuil aérobie », et correspond à l'OPLA (« Onset of Plasma Lactate Accumulation »)(111).

- la seconde valeur, égale à une lactatémie de 4 mmol.L^{-1} , est identifiée comme étant le « seuil anaérobie » (112).

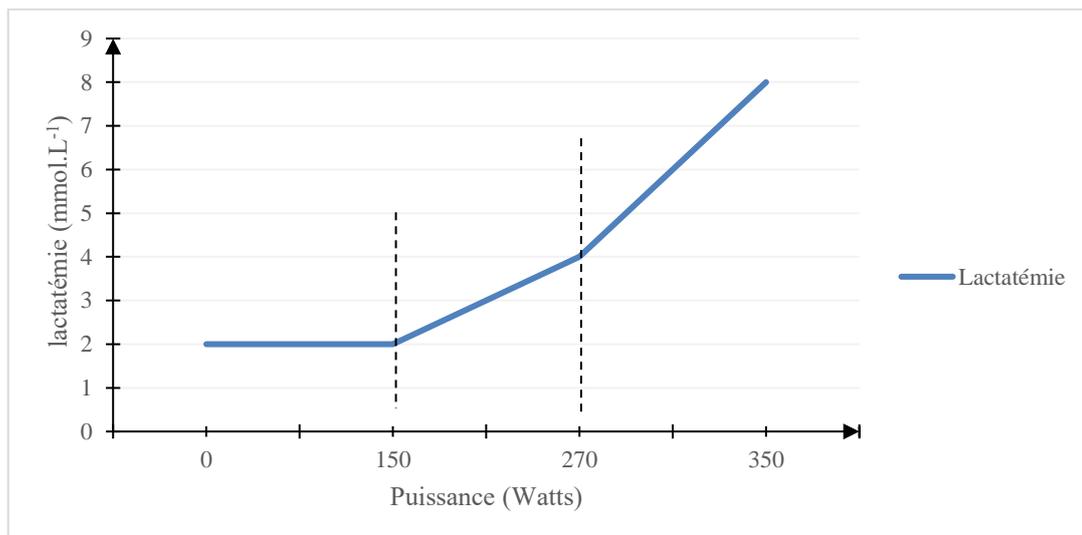


Figure 11 : Exemple d'évolution de la lactatémie (mmol.L^{-1}) au cours d'un test triangulaire permettant la détection des seuils lactiques.

Le choix du protocole, notamment celui de la durée des paliers, joue un rôle essentiel sur les valeurs résultant du seuil anaérobie (113).

Le dépassement du seuil de lactate quant à lui est défini comme l'intensité de l'exercice coïncidant avec une augmentation brusque de l'accumulation de lactate dans le sang, attribuée à l'incapacité de la personne qui fait de l'exercice à métaboliser continuellement l'excès de production de lactate (114).

Lorsque l'on souhaite déterminer un seuil lactique, dans un test triangulaire, le sujet effectue une série de paliers à des vitesses croissantes et, après chaque palier, un échantillon de sang est prélevé pour analyser la lactatémie. La vitesse à laquelle la concentration en lactate change est considérée comme la vitesse au seuil lactique et est utilisée comme un facteur prédictif de la performance. De nombreuses études ont montré que les différents indicateurs du seuil lactique étaient de bons prédicteurs de la performance dans diverses activités d'endurance (par exemple, course à pied, en vélo, à la marche) à la fois pour des populations entraînées et non

entraînées. Dans la plupart de ces études, l'association entre le seuil lactique et la performance a été évaluée dans des groupes d'athlètes avec des performances sur différentes distances relatives. De fait, si l'on réduisait la gamme de performances (ou du seuil lactique) sur laquelle cette relation a été étudiée, on s'attendrait à ce que la corrélation soit nettement réduite. Cela signifierait donc que même si la vitesse au seuil lactique expliquait une grande partie de la variance des performances (111), d'autres facteurs peuvent encore influencer la performance.

Concernant la détermination des seuils ventilatoires l'ensemble des chercheurs s'appuient sur l'observation et la détection de point de rupture dans l'évolution des paramètres métaboliques (acide lactique, ammoniac) et ventilatoires par l'observation de l'évolution : du débit ventilatoire (\dot{V}_E en $L \cdot \text{min}^{-1}$), de l'équivalent ventilatoire ($\dot{V}_E/\dot{V}O_2$ pour l'oxygène et $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$ pour le CO_2), de la valeur de CO_2 expiré ($\dot{V}CO_2$, en $L \cdot \text{min}^{-1}$) et du quotient respiratoire $\dot{V}CO_2/\dot{V}O_2$. Le seuil ventilatoire est défini comme l'intensité de l'exercice coïncidant avec une augmentation non linéaire de la ventilation (115). L'apparition d'une acidose métabolique stimule une augmentation de la ventilation. Utiliser le seuil ventilatoire est un avantage car il est directement visible sur la courbe du sujet après son test d'effort (116–118) sans que les expérimentateurs aient besoin de procéder à une analyse du lactate (119).

Le seuil anaérobie est alors identifié par :

- 1) Un accroissement non linéaire de $\dot{V}CO_2$ et de \dot{V}_E en fonction de $\dot{V}O_2$ (120).
- 2) Une augmentation abrupte et systématique du QR ($\dot{V}CO_2/\dot{V}O_2$) et un accroissement de l'équivalent ventilatoire pour l'oxygène, E_{QO_2} ($\dot{V}_E/\dot{V}O_2$) sans décroissance réciproque de $\dot{V}CO_2$ (121).

Il existe une série de terminologies et de définitions contrastées et souvent contradictoires pour les seuils d'exercice, ce qui a créé une confusion considérable sur le terrain (122–124). Pour éviter toute confusion supplémentaire, les seuils ventilatoires seront désignés comme le premier seuil ventilatoire (SV1) et le deuxième seuil ventilatoire (SV2), et ceux-ci seront définis comme le premier et second point de rupture dans les échanges gazeux ou la ventilation, respectivement.

La puissance de l'exercice où $\dot{V}O_2$ est juste en dessous du point où le métabolisme anaérobie devient un facteur important de l'augmentation de la puissance de l'exercice et des modifications associées où des échanges gazeux se produisent, généralement entre 60 et 75% $\dot{V}O_{2\text{max}}$ (119, 120) est définie comme le seuil ventilatoire 1 (Figure 12). Il se produit lorsqu'il y a une augmentation de $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$ sans augmentation simultanée de $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$ (121).

Le seuil ventilatoire 2 est généralement observée à 81-88% de $\dot{V}O_{2max}$ (113, 119, 121). Il s'identifie par une première augmentation non linéaire de $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$ avec une augmentation continue de $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$.

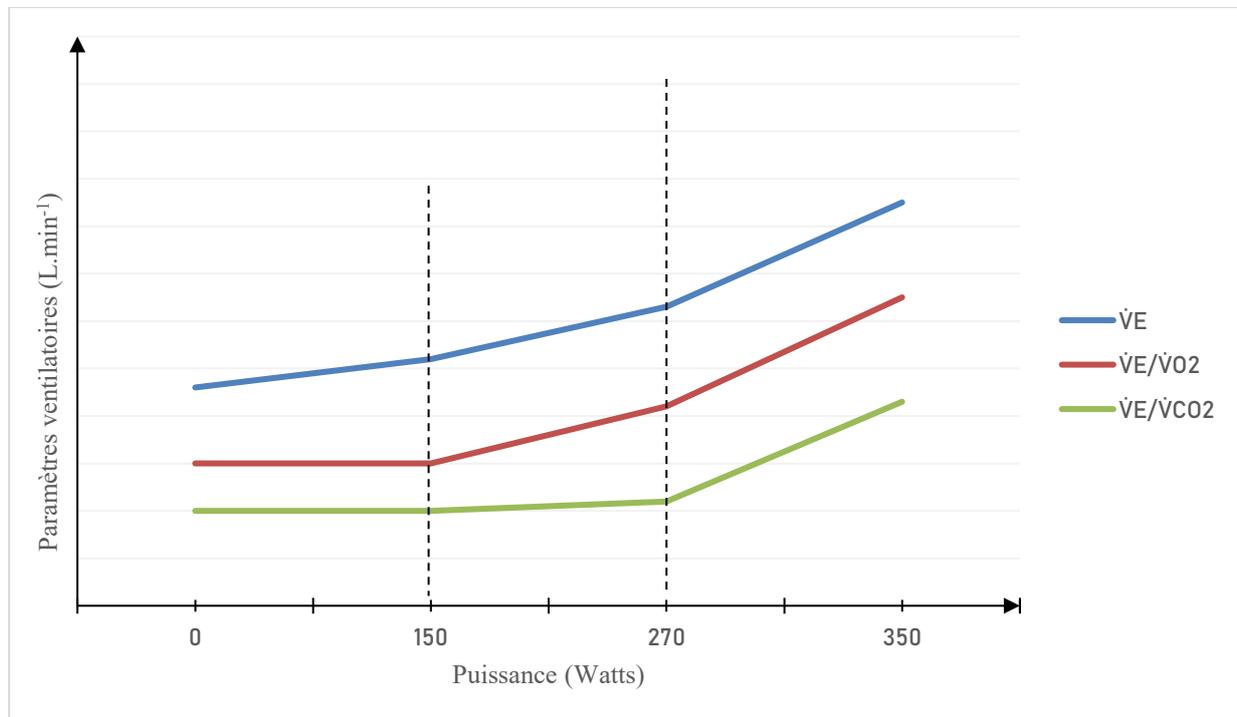


Figure 12 : Exemple d'évolution de \dot{V}_E , $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$, $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$ au cours d'un test triangulaire permettant la détection des seuils ventilatoires.

Bien que les seuils de lactate et ventilatoire soient définis comme des processus physiologiques différents, ils se produisent à proximité l'un de l'autre chez un individu en exercice et sont souvent utilisés de façon interchangeable (115).

2.4 Les entraînements intermittents (« interval training ») : puissance critique intermittente

Cette section sur l'entraînement intermittent permet de comprendre en quoi le choix du protocole, notamment celui de la durée des paliers, joue un rôle essentiel sur la sollicitation de $\dot{V}O_{2max}$. De fait, comment la variation de puissance (vitesse) sollicitant des vitesses entre le seuil lactique 2 et $v\dot{V}O_{2max}$ influe sur la performance.

Emile Zatopek, champion olympique de marathon à Helsinki en 1952, utilise et popularise une nouvelle méthode d'entraînement, l'exercice intermittent ou par intervalle. L'exercice intermittent se caractérise par une alternance de phase de travail et de repos (128).

Dans ce cas, le temps total en endurance durant un test intermittent dépend toujours de quatre principaux paramètres : la puissance durant l'intervalle de travail, la puissance durant l'intervalle dit «de repos », la durée de l'intervalle de travail et la durée de l'intervalle de « repos » (Figure 13, d'après Morton et Billat (129)).

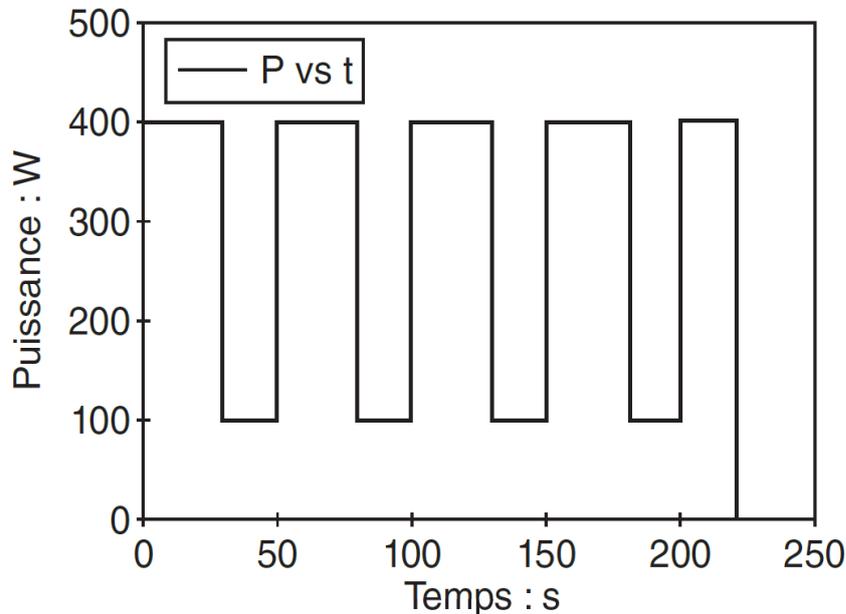


Figure 13 : Puissance (P) en watts pendant l'exercice intermittent. La puissance de sortie à tout moment (t) pendant un exercice intermittent, que ce soit pendant un intervalle de travail ou de repos, jusqu'à épuisement à t = 220 secondes (d'après Morton et Billat, (129)).

La durée de l'effort intermittent et les alternances travail/repos varient considérablement en fonction de l'auteur du protocole. En 1960, Åstrand, développa un entraînement par intervalles longs à une vitesse comprise entre la vitesse critique et $v\dot{V}O_{2max}$ (90 à 95% de $v\dot{V}O_{2max}$) (130). Il a alors estimé qu'il s'agissait de l'une des meilleures formes d'entraînement par intervalles pour améliorer le $\dot{V}O_{2max}$, car tous les paramètres cardiorespiratoires étaient à leur maximum.

Christensen et al., (128) ont ensuite proposé un entraînement à très court intervalle à 100% de $v\dot{V}O_{2max}$: courses de 10 secondes entrecoupées de 10 secondes de repos complet, car $\dot{V}O_2$ atteint $\dot{V}O_{2max}$ avec une faible accumulation de lactate dans le sang. Puis, Gorostiaga et al., (131) ont montré que l'entraînement par intervalles avec répétitions d'exercices de 30 secondes à 100% de $v\dot{V}O_{2max}$, séparés par un repos de 30 secondes, produisait des augmentations de $\dot{V}O_2$ max supérieures à celles d'un entraînement continu à 50% de $v\dot{V}O_{2max}$. Par la suite, Billat et al., (132) ont comparé le temps passé à courir à $\dot{V}O_{2max}$ dans un protocole d'entraînement par intervalles couramment utilisé (30 secondes à $v\dot{V}O_{2max}$, 30 secondes à 50% de $v\dot{V}O_{2max}$) à celui obtenu lors d'une course à vitesse supra-critique. Les résultats ont montré que même si une

course supra-critique entraînait l'atteinte de $v\dot{V}O_{2max}$, le temps passé au $\dot{V}O_{2max}$ était bien inférieur à celui pratiqué lors des exercices de haute intensité avec des intervalles de 30 secondes. Billat et al., (133) ont rapporté que 100% de $v\dot{V}O_{2max}$ était l'intensité la plus efficace pour maximiser le temps passé à $\dot{V}O_{2max}$ par rapport aux durées jusqu'à épuisement à 90, 100, 120 et 140% (respectivement $15,8 \pm 39$ s, 190 ± 87 s, 73 ± 29 s et 18 ± 19 s).

Billat et al., (134) élaborent un protocole d'intervalle court de type 15 secondes-15 secondes à différentes intensités ; 1) alternant entre 90% et 80% $v\dot{V}O_{2max}$ (puisque la vitesse moyenne de cet intervalle a été fixée à 85% de $v\dot{V}O_{2max}$, l'amplitude était faible 11%) ; 2) alternant entre 100% et 70% de $v\dot{V}O_{2max}$ (l'amplitude était moyenne : 35%) ; 3) alternant entre 110% et 60% de $v\dot{V}O_{2max}$. Dans cette étude de Billat et al., puisque la vitesse moyenne était de fixée à 85 % de la $v\dot{V}O_{2max}$ (l'amplitude était élevée : 59%), ils s'accorderont donc à dire qu'il est possible de maintenir $\dot{V}O_{2max}$ pendant 14 min. Par la suite, Midlgey et Naughton (135) recommandent un exercice entre 90% et 105% de la puissance à $\dot{V}O_{2max}$ car celui-ci permet d'allonger le temps maintien du $\dot{V}O_{2max}$ comparé à l'exercice continu.

Le consensus actuel sur la durée de l'intervalle de travail, est de 3 à 5 min (136) car, des intervalles de 1 min se sont révélés insuffisants, menant à un taux de $\dot{V}O_2$ de 85% de $\dot{V}O_{2max}$, comparé à 92-93% à des intervalles de 2 à 6 min pour des exercices de même intensité (125).

En effet, $v\dot{V}O_{2max}$ est facile à mesurer avec un test incrémental et peut être utilisé comme référence pour l'étalonnage de l'entraînement par intervalles. En outre, hors saison de compétition, il semble préférable de faire référence aux vitesses associées à des réponses physiologiques particulières dans la plage allant de l'état d'équilibre maximal du lactate à la vitesse maximale absolue.

En conclusion, lorsqu'on compare directement les protocoles continus à l'intervalle training, la majorité des recherches récentes ont démontré des améliorations nettement supérieures obtenues grâce à l'intervalle training pour les variables physiologiques et la performance (130, 131). Les protocoles intermittents sont généralement caractérisés par :

- des périodes répétées d'exercices de courte à moyenne durée (≤ 5 min),
- une intensité supérieure au seuil ventilatoire 2, et supérieure ou égale à l'état stable maximal de la lactatémie,
- une intensité $\geq 90 - 120\%$ de la vitesse maximale de consommation d'oxygène ($v\dot{V}O_{2max}$), avec une période de récupération généralement passive ou de faible intensité (139).

3 Les tests de terrain ou en laboratoire analysés sous l'angle d'une variable de contrôle

Les variables de contrôle appelées également variables indépendantes (ou de consigne) sont les facteurs que nous utilisons dans le but d'analyser leurs impacts sur les variables que l'on souhaite étudier et de fait mesurer. Les variables que l'on souhaite mesurer sont donc les variables dépendantes. Les variables dépendantes sont susceptibles de dépendre du changement de modalité d'une ou plusieurs variable(s) indépendante(s).

3.1 Variable de contrôle : le temps

Parmi les différents tests de terrain indirects pour la prédiction de $\dot{V}O_{2max}$ où la variable de contrôle est le temps, le test de course de 12 minutes de Cooper (1968) fut le premier. Le test de Cooper avait mis en correspondance la distance courue à allure libre sur 12 minutes et la consommation maximale d'oxygène sans aucune notion de vitesse maximale aérobie qui arriva dans les années 80 avec Jack Daniel (133, 134). A l'époque, la critique principale émise est que l'alternance de course-marche était possible, l'allure étant laissée au libre choix du coureur. De plus, 12 minutes est une durée supérieure à celle que la moyenne des coureurs est capable de soutenir à VMA. En effet, d'après Åstrand et Saltin (53), la durée de maintien d'une puissance maximale aérobie (ou vitesse maximale aérobie) serait comprise entre 2 et 8 minutes.

D'autres auteurs ont conclu que la consommation d'oxygène pendant un travail épuisant est non seulement le meilleur indicateur physiologique de la capacité d'un homme à supporter un travail musculaire intense, mais également la méthode la plus objective permettant de déterminer la forme physique d'un individu par son système cardio-vasculaire (62,142,143).

La détermination de la vitesse maximale aérobie ($v_{a_{max}}$) dépend de la durée du palier dans lequel elle est mesurée. Par exemple, à cette époque entre le terrain et le laboratoire il y a des différences. Dans le protocole de Brue, $v_{a_{max}}$ est mesurée au dernier palier du test complètement terminé, elle est donc maintenue pendant 30 secondes (durée de chaque étape), alors que lors des mesures sur tapis roulant, le temps des paliers est de 3 ou 4 min (144).

Brikci et Dekkar (1989) ont démontré une corrélation significative entre le test de marche de 5 minutes et $\dot{V}O_{2max}$ ($r = 0,93$; $n = 38$), mais ces auteurs n'ont pas comparé la performance de test sur le terrain à $v_{a_{max}}$ parce que les tests en laboratoire étaient effectués sur un ergocycle (145). En effet, en fonction des études, la durée de la performance de course qui est maintenue à 100% $v_{a_{max}}$, soit, le concept de "Temps limite à $v_{a_{max}}$ " développé par Billat et al., (1994), varie

de 5 min à 8 min. Pour autant, il n'est pas nécessaire de courir plus de 5 minutes à une allure régulière pour améliorer de manière significative la corrélation entre le $\dot{V}O_{2max}$ mesurée en laboratoire et la performance (146).

Par conséquent, afin de vérifier si un test de course à pied continu maximal de 5 minutes permet une mesure précise de la v_{max} et correspond au $\dot{V}O_{2max}$, les résultats de ce test sur le terrain ont été comparés à v_{max} et au $\dot{V}O_{2max}$ déterminés en laboratoire sur un tapis roulant et pendant le test de l'University Montréal Track Test (UMTT) (Léger et Boucher 1980, modifié par Brue et al. 1986). De plus, ces vitesses enregistrées lors de l'UMTT ont été comparées aux meilleures performances de l'athlète sur 800 m, 1 500 m, 3 000 m, 5 000 m, 10 000 m et semi-marathon de la saison correspondante.

Il ressort de cette étude de Bethon et al., (1997) que la durée minimale permettant de déterminer v_{max} dépend du temps nécessaire pour obtenir la composante aérobie maximale avec une participation anaérobie réduite. Lorsque la vitesse calculée à partir d'une performance allant de 100 m jusqu'au marathon (42,195 km) est liée au logarithme du temps, l'intersection des " lignes aérobies et anaérobies " s'est avérée se croiser à une durée de 4,97 min (147). Ce temps correspondait à la performance sur 1 500 ou 2 000 m. Enfin, la procédure du test de 5 minutes de course était plus facile à réaliser que celle de l'UMTT car contrairement à l'UMTT, il n'était pas nécessaire d'avoir un cycliste pour régler la vitesse avec précision. En revanche, le test de 5 minutes pourrait désavantager les sujets moins expérimentés qui ne savent pas comment choisir la vitesse maximale qu'ils peuvent maintenir aussi régulièrement que possible pendant toute la durée du test (144). Pour conclure, le test de 5 minutes a fourni des informations précieuses sur la v_{max} qui était proche et fortement corrélé avec les résultats du tapis roulant et les performances sur piste, en particulier à plus de 3 000 m. Ce test pouvait également être utilisé pour l'évaluation de $\dot{V}O_{2max}$.

Les chercheurs ont par la suite souhaité comprendre ce qu'impliquerait des temps limites plus longs sur les réponses physiologiques.

Mccole et al., (148) ont comparé un test d'une durée de 6 min sur tapis roulant à une durée de 12 min. Bien qu'il n'y ait pas de différence de $\dot{V}O_{2max}$ entre les deux tests, le test d'exercice maximal de 6 minutes a mesuré un débit cardiaque ($\dot{Q}c$) significativement plus élevé que le test de 12 minutes, en raison d'un volume systolique significativement supérieur. Ainsi, il y a eu une dissociation entre $\dot{V}O_2$ et $\dot{Q}c$ pendant l'exercice maximal. A vrai dire, lorsque l'individu est confronté à des consignes de temps limites différents, il va opter pour des stratégies de type all-out (effort total) selon la durée limite imposée. En effet, lors d'efforts de type

continus d'une durée maximale d'environ 2 à 3 minutes, la littérature indique que la performance optimale est généralement atteinte avec une stratégie all-out (un effort total, autrement dit les sujets doivent atteindre leur puissance/vitesse de pointe le plus rapidement possible dès le début du test et la maintenir aussi élevée que possible) ou un départ rapide (149–152). Cependant, au-delà de consignes de temps limite de 2 à 3 minutes, la stratégie de course optimale pour améliorer la performance reste à déterminer. Pour l'heure, il est considéré que les modèles d'exercice à puissance constante soient ceux qui induisent la plus haute performance (88, 132, 146).

Jones et al., (154) ont constaté que le temps avant l'épuisement pendant un exercice à haute intensité était considérablement prolongé lorsque les sujets utilisaient un départ rapide comparé à une puissance constante ou à un départ lent. De fait, la cinétique de l'oxygène était significativement plus rapide dans les conditions de départ rapide que dans les conditions de puissance constante ou départ lent. Bailey et al., (155) ont alors interprété ces données comme indiquant que la stratégie d'allure avec un départ rapide avait amélioré le rendement des exercices à haute intensité. Cette amélioration est permise par l'épargne de la contribution de l'énergie anaérobie au renouvellement de l'énergie pendant la transition du repos à l'exercice, de sorte que l'énergie anaérobie puisse être utilisée plus tard lors de la période d'exercice (154).

Cependant, les tests jusqu'à l'épuisement ne reflètent pas adéquatement les exigences physiologiques ou la stratégie d'allure adoptée en compétition. Par exemple, les épreuves de moyenne et longue distance se terminent souvent par un " sprint final " (156–159).

Ainsi, une étude de l'interaction des changements dans la cinétique de l'oxygène et des changements dans la performance de l'exercice devrait donc impliquer :

- différentes stratégies initiales d'allures,
- un retour à la même fréquence de travail constante,
- et une phase de sprint final dans laquelle les sujets tentent de maximiser le travail effectué.

C'est ce qu'ont fait Bailey et al., (155) en souhaitant comprendre comment la stratégie de course (départ rapide, départ lent, ou vitesse constante) et la durée de l'exercice (3 et 6 minutes) interagissaient pour déterminer le sprint final et la performance globale de l'exercice de haute intensité. Bien que des différences de cinétique de l'oxygène entre les trois stratégies de course aient persisté lors des protocoles de 6 minutes, il n'y avait aucune différence entre les indices de performance (vitesse pic, temps mis pour atteindre la vitesse pic...). Au cours d'un exercice " extrême " de courte durée (3 minutes), une stratégie d'allure avec un départ rapide

pourrait améliorer les performances en permettant d'atteindre $\dot{V}O_{2max}$ (lorsque cela n'est normalement pas possible) et en permettant au coureur d'utiliser toute l'énergie encore disponible au-delà de la puissance critique (26,155). Cependant, au cours d'un exercice " sévère " de 6 min où $\dot{V}O_{2max}$ est normalement atteint, les différences dans la stratégie d'allure ont un effet relativement faible sur les résultats en termes de performances.

Une méta-analyse (160) a permis de conclure sur une durée optimale d'effort permettant d'estimer $\dot{V}O_{2max}$ quel que soit l'âge, le sexe et le type de locomotion (marche ou course) qui était de 12 minutes dans le cas du choix d'une variable de contrôle de temps (Équation 11) ou 2,4 km (1,5 Miles) dans celui du choix de la variable de contrôle de distance (Équation 12) (76).

$$\dot{V}O_{2max} = (\text{distance} + 504.9) / 44.73 \quad \text{Eq.11}$$

Équation 11 : Où, $\dot{V}O_{2max}$ est la consommation maximale d'oxygène en $\text{mL.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ et la distance est la distance parcourue en 12 minutes (mètres).

$$\dot{V}O_{2max} = 3.5 + 483 / 1,5 \text{ temps} \quad \text{Eq. 12}$$

Équation 12 : Où, $\dot{V}O_{2max}$ est la consommation maximale d'oxygène en $\text{mL.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ et « 1,5 temps » est le temps mis pour parcourir les 1,5 Miles (min).

Si Åstrand et Saltin (53) auparavant avait démontré qu'il était possible de déterminer $\dot{V}O_{2max}$ en 3-min, 45 ans plus tard, Burnley et al., (161) ont utilisé ce protocole de temps limite pour déterminer la vitesse critique qui est alors l'asymptote de la relation puissance-temps au cours de l'effort de type all-out (162).

3.2 Variable de contrôle : la distance

Cependant, la distance reste la variable de contrôle la plus « naturelle » au plan sportif et même domestique. En effet, la performance en course à pied est définie comme étant le temps pour accomplir une distance donnée, fixée par le règlement sportif ou par les impératifs de l'environnement. Autrement dit, le sujet va devoir gérer son énergie et sa puissance en fonction de son choix de confort et/ou de temps minimum (performance sportive en course à pied notamment).

Il est communément admis, concernant les durées d'exercice préconisées pour solliciter $\dot{V}O_{2max}$, que les distances de 1500 à 5000m sollicitent $\dot{V}O_{2max}$ sur la plus longue durée (cf. chapitre 1 partie 1.3). Cependant, Maron et al., (163) ont montré qu'à l'approche du 37^{ème} kilomètre, un assez bon coureur (2h36) a atteint 100 % de $\dot{V}O_{2max}$ alors que les coureurs de marathon ne maintiennent généralement pas une allure régulière sur l'ensemble des 42,195 km

et que les conditions environnementales et de terrain peuvent varier considérablement. De plus, ils ont montré que la consommation d'oxygène se situait entre 68 et 100 % de $\dot{V}O_{2max}$ (dans les kilomètres précédents et lors du dernier kilomètre) en raison d'une accélération finale comme dans le record du monde du marathon de 2018 (164).

La plupart des études se sont centrées sur la contribution respective des métabolismes aérobie et anaérobie sans s'intéresser à l'énergie à la consommation maximale d'oxygène (165–167). En effet, l'utilisation de la méthode du déficit en oxygène accumulé (“accumulate oxygen deficit”, AOD) popularisée par Medbø et al., (168) a permis à un certain nombre de chercheurs de rapporter les contributions relatives des systèmes énergétiques pour un exercice exhaustif sur des durées variables (169–171).

Ces études et bien d'autres ont utilisé soit un exercice “all-out” sur une période de temps donnée, soit un exercice à intensité constante, habituellement à un pourcentage de $\dot{V}O_{2max}$, jusqu'à épuisement. Peu d'études ont tenté de simuler une course. La plupart des courses se déroulent sur des distances déterminées, la vitesse étant généralement fonction des débits et des capacités énergétiques de chacun. Bien que des extrapolations à partir des données disponibles dans la littérature soient apparues (172), il existe peu d'analyses directes des courses. Les données de l'étude de Spencer et Gastin (173), suggèrent que la contribution des systèmes d'énergie aérobie est beaucoup plus importante que ce qui a été étudié jusqu'à présent.

Étant donné la rareté des données sur la contribution des systèmes énergétiques et la nécessité de réévaluer l'information traditionnelle présentée dans la littérature, Spencer et Gastin (173) ont conçu un protocole afin de dresser le profil de la réaction des systèmes énergétiques aérobies et anaérobies pendant les exercices sur tapis roulant à haute vitesse qui simulaient des courses sur piste de 200, 400, 800 et 1500 m. La contribution relative du système d'énergie aérobie aux systèmes d'énergie 200, 400, 800 et 1500 m étaient respectivement de $29\% \pm 4$, $43\% \pm 1$, $66\% \pm 2$ et $84\% \pm 1$. Ces auteurs en concluent que la contribution relative du système d'énergie aérobie est considérable et supérieure à ce qui a été traditionnellement accepté pendant les courses de 200, 400, 800 et 1500 mètres.

Les épreuves de course sur piste de 100 m et 200 m, d'une durée de 10 à 25 secondes, sont caractérisées comme des événements supra-maximaux hautement anaérobie (174). Bien que l'implication du métabolisme aérobie dans des événements d'une aussi courte durée puisse être

minime, la vitesse d'interaction des processus oxydatifs avec l'apport métabolique global est plus rapide que celle décrite antérieurement (173).

Duffield et al., (168, 169) se sont alors penchés sur la détermination de la contribution relative du système énergétique aérobie-anaérobie selon la méthode du déficit d'oxygène (AOD) de Medbo (168), pour les athlètes masculins et féminins mais aussi selon la méthode d'estimation de la dégradation de la phosphocréatine. La contribution de l'énergie glycolytique basée sur l'accumulation de la concentration maximale de lactate dans le sang après la course, a été calculée selon di Prampero comme étant de $3,0 \text{ mL O}_2 \text{ équivalent.kg}^{-1}$ de masse corporelle pour chaque mmol qui augmente au-dessus du niveau du préexercice (177). La contribution des réserves de phosphocréatine (PCr) a été calculée comme étant $37,0 \text{ mL O}_2 \text{ .kg}^{-1}$ de masse musculaire (177). Il en résulte selon la méthode AOD, que les contributions relatives des systèmes énergétiques aérobie-anaérobie pour les hommes et les femmes sont de 21%-79% et de 25%-75 % respectivement, pour les épreuves de 100 m et de 28%-72% et de 33 % - 67 % respectivement, pour les épreuves de 200 m. En comparaison, la contribution énergétique anaérobie relative calculée à partir des mesures de La/PCr a montré une plus grande contribution du système énergétique anaérobie (175). Bien que ces estimations aient été fondées sur des données mesurées au cours de courses réelles de 100 m et de 200 m, les limites inhérentes à l'application des méthodes d'estimation de l'implication du métabolisme anaérobie limitent en partie l'exactitude de ces résultats. Cette recherche est la première à mesurer l'énergie pendant les épreuves sur piste de ces distances, et les données obtenues ici pour les estimations d'AOD et de La/PCr sont conformes aux estimations fondées sur les résultats antérieurs de laboratoire et la modélisation mathématique de ces épreuves sportives (163, 171, 172).

D'après di Prampero, contrairement à la course à vitesse constante, le nombre d'études consacrées au sprint est plutôt faible. Cela n'est pas surprenant, puisque l'objet même en jeu ne permet pas d'atteindre un état stable, rendant ainsi tout type d'analyse énergétique plutôt problématique. En effet, les seuls travaux publiés sur ce sujet traitent soit de certains aspects mécaniques de la course de vitesse (173, 174), soit de quelques approches indirectes de sa contribution énergétique (96, 175, 176).

En résumé, la contribution du système d'énergie anaérobie sur des courses de 1500 m est estimée entre 13 et 50 % (184), et aucune donnée n'est disponible pour la course de 3000 m. Les procédures de modélisation mathématique basées sur l'analyse des performances en course à pied et les records du monde pour les athlètes masculins ont également estimé des contributions aérobies de 76 % (1500 m ; 209 s), 82 % (2000 m ; 291 s) et 88 % (3000 m ; 452 s) (179). Duffield et al., (175), nous ont éclairé quant à la contribution des systèmes d'énergie lors d'une

course simulée de 1500 m où la contribution aérobie/anaérobie était de 77/23 % et 86/14 % pour les hommes et les femmes respectivement ; pour les 3000 m, ces proportions étaient de 86/14 % et 94/6 % respectivement pour les hommes et les femmes.

Dans les années 1960, il a été rapporté que la consommation d'oxygène atteignait un état d'équilibre maximal pendant un exercice de courte durée (de 2 à 7 min) et de haute intensité (46, 178). Néanmoins, plusieurs études portant sur des exercices à haute intensité d'une durée de 45 secondes à 4 min ont rapporté des résultats contradictoires concernant l'atteinte de la consommation maximale d'oxygène (166, 179, 180). Ces différents résultats peuvent être dus à la conception des protocoles puisque dans ces différentes études, les exercices ont été effectués soit à une vitesse de course constante (179, 180), soit à une allure particulière avec une stratégie de départ plus lent et une arrivée plus rapide que la vitesse moyenne de la course (173).

En outre, Gajer et al., (188) suggèrent que les meilleures performances pour des durées d'exercice comprises entre 60 secondes et 4 min 30 devraient être réalisées avec un départ rapide suivi d'une transition rapide avec une stratégie de course à pied régulière telle qu'observée en compétition pour la course à pied. Ce démarrage rapide pourrait accélérer la cinétique de $\dot{V}O_2$ puis améliorer la performance supra maximale en augmentant le nombre total de fibres musculaires et/ou la proportion de fibres de type II impliquées, puis le taux de renouvellement de l'ATP nécessaire pour alimenter un exercice à distance ou durée fixe (143, 182).

Enfin, nous savons également que la consommation d'oxygène peut atteindre $\dot{V}O_{2max}$ au cours d'un exercice bref et intense à condition que la durée soit suffisante pour l'intensité requise (183, 184). Il semblerait alors, d'après les résultats de Spencer et Gatin (173), que les vitesses moyennes utilisées d'une part et la durée des exercices d'autre part n'étaient pas suffisantes pour atteindre $\dot{V}O_{2max}$ lors des tests effectués à puissance constante. Bien qu'un démarrage rapide puisse aider à accélérer la cinétique de l'oxygène, ce dernier a aussi le potentiel de causer de la fatigue prématurée et de nuire à la performance.

Lorsqu'une simulation d'une compétition de course sur piste extérieure de 800 m a été effectuée dans des conditions de terrain, Thomas et al., (192) ont montré que tous les athlètes ont atteint leur consommation maximale d'oxygène. Dans cette étude, le protocole d'exercice reproduisait les conditions réelles d'une compétition de course de 800 m, et une attention particulière avait été portée à la stratégie de compétition.

Récemment, l'analyse des performances dans les courses de demi-fond effectuées sur le terrain a montré de grandes variations de vitesse (153). Ces dernières études ont montré que la meilleure performance chronométrique est obtenue lorsque la vitesse au départ des courses de

800 m et 1500 m est plus rapide que la vitesse moyenne de la course. Cela pourrait s'expliquer par des raisons tactiques.

En ce qui concerne les exercices supra maximaux plus longs, l'impact d'une stratégie de départ à haute intensité pendant la course à pied n'a pas encore été étudié. La vitesse au début de la course est plus lente dans une course de 1500 m (153) que dans une course de 800 m (187). De plus, en raison de la durée d'un exercice de 1500 m, ces mêmes auteurs ont souligné que le coût métabolique aérobie est plus élevé. Les résultats de l'étude de Hanon et al., (153), suggèrent que $\dot{V}O_{2max}$ a été maintenu lors d'un protocole d'exercice reproduisant les conditions d'une compétition de course à pied de 1500 m avec une stratégie de départ rapide suivie d'une vitesse de course régulière. En étudiant les stratégies de course adoptées lors des performances records du monde dans les courses de 800, 5000- et 10 000 m, Tucker et al., (193), ont noté des différences clés entre le 800 m, pour lequel le deuxième tour était significativement plus lent que le premier tour, et le 5000 m et 10 000 m, où une poussée finale était observée en raison du maintien de réserves pendant la partie intermédiaire des course. D'un point de vue énergétique, les courses de 800 m et de 5000 m semblaient être régulées différemment. Hanon et Gajer (194) ont décrit les stratégies de régulation utilisées par les coureurs d'élite du 400 m et ont constaté que le dernier 100 m était aussi le plus lent de toute la course, tout comme le dernier 100 m des courses du 800 m élite.

Nous avons dans notre article 2 de thèse, voulu montrer que cette énergie spécifique permettait d'avoir un socle énergétique commun non significativement différent sur les toutes les distances de courses. Cela à condition de l'exprimer en pourcentage de l'énergie aérobie ainsi que nous allons le développer dans le chapitre 2 « contribution personnelle ».

3.3 Variable de contrôle : les facteurs physiologiques

3.3.1 La Fréquence cardiaque

La fréquence cardiaque (FC) est souvent prise en référence afin d'estimer le $\dot{V}O_{2max}$ des sujets. Par exemple, dans certains protocoles, la capacité physique est évaluée à partir de données sur la charge de travail (puissance) ou la consommation d'oxygène à un rythme cardiaque donné, par exemple 170 ou 150 battements.min⁻¹ (195).

La capacité physique à 170 battements.min⁻¹ calculée est liée volume d'éjection systolique du cœur, mais n'est pas une mesure de l'efficacité ou de la puissance mécanique maximale. Dans une telle estimation, la fréquence cardiaque maximale doit être prise en compte.

Si la consommation d'oxygène est mesurée pendant un test sous-maximal, il est illogique de ne pas tenir compte de la variation individuelle de l'efficacité mécanique en exprimant la "capacité" en watts par minute à une fréquence cardiaque de 170 battements.min⁻¹. Cependant, l'erreur la plus importante est introduite lorsque les scientifiques comparent ou évaluent des individus d'âges différents sans corriger le déclin de la fréquence cardiaque maximale avec l'âge. La valeur moyenne de la fréquence cardiaque et de la consommation d'oxygène sous-maximale donnée est la même pour les personnes du même sexe et du même niveau d'entraînement quel que soit leur âge (de 25 à 70 ans (196)).

Par définition, la capacité physique à 170 battements.min⁻¹ calculée ou la saturation en oxygène dans le sang à une allure d'exercice donnée sont donc les mêmes. La capacité réelle de performance diminue cependant avec l'âge. De plus, le sentiment subjectif de contrainte est plus élevé à une fréquence cardiaque donnée chez les personnes âgées.

Des études ont également confirmé qu'il existe une faible corrélation entre la consommation d'oxygène ou la fréquence de travail atteinte à une fréquence cardiaque de 170 ou 150 bpm et $\dot{V}O_{2max}$, le débit cardiaque, la taille du cœur ou le volume sanguin mesurée chez des individus de 20 à 70 ans (197). La conclusion est qu'une évaluation de la consommation maximale d'oxygène, basée sur des études portant sur les charges de travail sous-maximales, devrait être effectuée avec la plus grande prudence, surtout si l'on considère les personnes appartenant à différents groupes d'âge.

Actuellement on note un décalage entre la pratique des coureurs, qui contrôlent leur effort en fonction d'une zone de fréquence cardiaque telle qu'elle est référencée dans les logiciels des cardiofréquencemètre GPS indiquant des zones de FC (198–200), et l'utilité scientifique de courir en fonction de ces zones. En effet, la prescription d'exercice est souvent basée sur une relation linéaire entre la consommation d'oxygène $\dot{V}O_2$ et l'intensité de l'exercice mais aussi avec la fréquence cardiaque. Cependant, selon Zuccarelli et al., (201) en comparant les composantes lentes de FC et $\dot{V}O_2$, ils constatent une absence de relation linéaire entre FC et $\dot{V}O_2$ dans différents domaines d'intensité (modéré/élevé/sévère). Ces auteurs démontrent l'apparition d'une composante lente de FC lors d'un protocole à intensité plus faible (modérée) que celle de la composante lente de $\dot{V}O_2$ et, qu'à une même intensité absolue, l'amplitude relative de la composante lente de la cinétique de la FC est supérieure à celle de la composante lente de la cinétique de la $\dot{V}O_2$. Ils en concluent que les prescriptions d'exercices à des valeurs de FC

spécifiques, lorsqu'elles sont effectuées pendant des périodes de plus de quelques minutes, pourraient entraîner une fatigue prématurée (201).

Cependant aucune étude à notre connaissance n'a décrit les réponses physiologiques et de vitesse en fonction de la fréquence cardiaque de contrôle. De même, l'intérêt d'un tel contrôle de la vitesse par la fréquence cardiaque dans une perspective de performance, non pas à l'entraînement mais en compétition, n'a pas été investigué. C'est pourquoi nous l'avons réalisé et présenté dans la partie « contribution personnelle » au sein de l'article 3.

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

La consommation d'oxygène est encore plus rarement choisie comme variable de contrôle dans la mesure où l'asservissement de la vitesse de course par $\dot{V}O_2$ est plus délicat surtout sur le terrain. Cependant, l'évolution des nouvelles technologies, avec notamment le K5 (Cosmed®, Rome, Italie) et son système de Bluetooth® à longue portée permet de contrôler en temps réel la vitesse par $\dot{V}O_2$ dès lors que l'expérimentateur se place au centre de la piste d'athlétisme, ce qui a été réalisé et présenté dans la 3^{ème} étude de cette thèse.

Le contrôle de la puissance par $\dot{V}O_2$ a été pour la première fois utilisé afin de mettre en évidence que le temps limite à $\dot{V}O_{2max}$ n'était pas limité par $\dot{V}O_{2max}$ mais par la puissance. En effet, Lepretre et al., (202), ont démontré que contrôler $\dot{V}O_2$ à la valeur intermédiaire (D50) entre le seuil lactique et le pic de $\dot{V}O_2$ (enregistrés lors d'un test incrémenté) a induit une oscillation de la puissance, ce qui a réduit la puissance moyenne de l'exercice (276 ± 47 contre 315 ± 40 W, $p = 0,004$) et annulé la composante lente de la cinétique d'oxygène.

Depuis, Petot et al., (33) ont montré qu'en abaissant la puissance en fin de protocole triangulaire, alors que le sujet avait atteint un plateau de $\dot{V}O_{2max}$, permettait de multiplier le temps limite à $\dot{V}O_{2max}$ par 8. En effet, $\dot{V}O_{2max}$ était maintenu en raison de la diminution progressive de la puissance jusqu'à l'état maximal du lactate (75% de la puissance à $\dot{V}O_{2max}$), expliquant cet allongement du temps limite et donc l'augmentation de la contribution de l'énergie à $\dot{V}O_{2max}$. En effet, par ce protocole, les expérimentateurs souhaitaient mesurer « l'endurance » à $\dot{V}O_{2max}$.

Durant cette étude, le sujet doit fournir un effort continu le plus long possible durant lequel le $\dot{V}O_2$ est maintenu à sa valeur maximale. La puissance initiale correspond à la puissance à $\dot{V}O_{2max}$ (préalablement mesurée lors du test incrémenté) jusqu'à l'atteinte du $\dot{V}O_{2max}$, dès que $\dot{V}O_{2max}$ est atteint, la puissance est abaissée et ajustée en permanence et en temps réel pour maintenir $\dot{V}O_2$ à sa valeur maximale le plus longtemps possible (33). Au cours des premières

secondes du plateau du $\dot{V}O_{2max}$, la première baisse de puissance est en moyenne de 29W/10 secondes. Puis, la puissance est continuellement ajustée par palier de 5 à 10 Watts. Le $\dot{V}O_2$ est directement contrôlé sur un ordinateur. S'il passe en dessous de la borne inférieure de 95% $\dot{V}O_{2max}$, la puissance est à nouveau augmentée par palier de 5 ou 10 W. L'arrêt du test est déterminé par le sujet lui-même s'il n'arrive plus à poursuivre son effort, s'il n'arrive plus à maintenir la cadence de pédalage demandée, ou si le $\dot{V}O_2$ continue à baisser malgré une augmentation de puissance.

Ainsi, la variation de puissance est le vrai facteur limitant de l'endurance au $\dot{V}O_{2max}$ et l'exercice contrôlé par le maintien de $\dot{V}O_2$ à sa valeur maximale permet de reculer l'arrêt de l'exercice. Ce nouveau protocole à puissance variable démontre que l'endurance à $\dot{V}O_{2max}$ peut être supérieure à 15 min pour la plupart des sujets indépendamment de leur valeur de $\dot{V}O_{2max}$. Petot et al., (33), démontrent également que les facteurs limitants le $\dot{V}O_{2max}$ et l'endurance à $\dot{V}O_{2max}$ sont différents. Partant de ces faits, ce nouveau modèle de test contrôlé par $\dot{V}O_{2max}$ peut être une nouvelle approche pour de futures recherches sur les limites de la capacité aérobie humaine.

3.4 Variable de contrôle : la perception de l'effort

De nombreuses études ont montré que la stratégie de course a un impact sur les réponses physiologiques et en particulier sur la consommation d'oxygène. Selon St Clair Gibson et al., (203), quatre stratégies peuvent être identifiées dans la réalisation d'un exercice :

- celle du départ lent avec augmentation progressive de l'intensité au fur et à mesure de la durée de l'exercice ;
- celle de la gestion d'allure constante de l'intensité durant toute la durée de l'exercice ;
- celle de la gestion variable (départ rapide, puis ralentissement et enfin accélération en fin d'exercice) ;
- celle dite « all-out », correspondant à un départ rapide puis à une diminution contrôlée de l'intensité.

Cette dernière stratégie est certainement la plus difficile à maîtriser puisque la moindre surestimation de la vitesse initiale engendre une chute catastrophique de l'intensité en fin de parcours du fait de l'apparition prématurée d'une fatigue. Elle n'est donc observée de façon efficace que chez les sportifs expérimentés. Néanmoins, en fonction des représentations et de l'expérience préalable pour un type d'effort, la stratégie employée reste identique pour une même

personne, quelle que soit la distance ou la durée d'exercice (203). Il est alors nécessaire de favoriser l'acquisition du pattern permettant la réalisation du meilleur niveau de performance.

Bien que les stratégies avec un départ rapide provoquent une diminution de la vitesse (194) et de $\dot{V}O_2$ en fin de course (146, 195–197), les stratégies de course n'en restent pas moins optimales selon le critère de performance sur le demi-fond court (800-1500m) (146, 196, 197). Ces auteurs concluent que la tactique optimale pour la performance sur ces distances intermédiaires consiste en une phase d'accélération initiale suivie d'une baisse contrôlée de la vitesse jusqu'à la fin de l'exercice. Ce résultat est en accord avec les conclusions de Billat et al., en 2009, qui ont démontré que les coureurs de 1500 m qui repoussaient les limites de leur puissance anaérobie dans la première partie de la course étaient ceux qui avaient réalisé les meilleures performances (204). Comme dans l'étude de Billat et al., (204) cette relation n'a été obtenue qu'au 1500 m, ce qui indique une régulation différente par rapport aux distances plus courtes.

En miroir de la consommation d'oxygène, le déficit qui représente la réserve anaérobie en temps réel est un contrôleur de la puissance (195, 198). En effet, Fukuba et Whipp (206) ont rapporté que la capacité de faire varier la vitesse au-dessus de la vitesse seuil de fatigue (puissance critique) dépend du rapport entre la réserve anaérobie appelée " capacité de travail anaérobie " en joules (le rapport dit du paramètre d'endurance) et la puissance critique. Billat et al., (204) ont montré qu'il était possible de modéliser avec une équation différentielle du 1er ordre le temps passé au-dessus de la vitesse critique.

Cependant, il est actuellement admis (depuis 2004, une soixantaine de travaux publiés dans des revues de haut rang scientifique développent ou s'appuient sur ce modèle) que la perception de l'exercice centralisée par un gouverneur nommé précisément le *Central Governor* de Noakes était le contrôleur global intégrant toutes les informations énergétiques et cardiorespiratoire en temps réel (185, 199–203).

Ce modèle du gouverneur central, place le cerveau au centre de la régulation de l'exercice. L'intérêt de cette régulation organisée par le cerveau est de pouvoir anticiper et s'adapter instantanément et en permanence de façon à accomplir l'effort demandé sans atteindre la rupture de l'équilibre physiologique (homéostasie) de notre organisme. Pour conforter son hypothèse Tim Noakes s'appuie sur plusieurs phénomènes contredisant la théorie de la fatigue périphérique en supportant sa théorie du gouverneur central, en voici deux exemples :

- Le sprint final ; selon la théorie de la fatigue périphérique, il paraît impossible d'accélérer à la fin d'une épreuve. Alors que le gouverneur central pourra permettre d'accélérer en fin d'épreuve sachant que l'effort est presque terminé (212).
- Les allures de courses variables, en fonction de la distance de course les athlètes expérimentés pouvant réguler leur allure. Seule la théorie du gouverneur central pourrait expliquer une telle variation dans les allures utilisées spontanément lors des épreuves (213).

Le gouverneur central est maintenant retenu par un nombre croissant d'auteurs pour expliquer les mécanismes de la fatigue au cours d'exercices de moyenne (214) à longue durée comme le marathon (215). Ainsi, des facteurs psychologiques et non purement physiologiques peuvent vraisemblablement influencer cette décision (216).

D'après Pageaux (217), il est très bien établi que la perception de l'effort a un rôle crucial sur l'exercice à puissance constante (211) et sur l'exercice auto-régulé (218). Enfin, nous savons également, qu'une augmentation de la perception de l'effort est une caractéristique principale de la fatigue, mais il faut noter que l'effort peut être ressenti en l'absence de toute fatigue induite par l'exercice. D'ailleurs, ce même auteur, définit la perception de l'effort comme la sensation consciente de " l'intensité, de la lourdeur et de la fatigue de l'exercice ". Cette définition est conforme aux descripteurs verbaux choisis à l'origine par Borg pour son échelle de perception de l'effort (RPE, Borg, 1998, tableau 1) et ne fait pas référence à d'autres sensations liées à l'exercice.

Echelle de Borg

6	aucune sensation d'effort
7	
8	extrêmement léger
9	très léger
10	
11	léger
12	
13	un peu dur
14	
15	dur
16	
17	très dur
18	
19	extrêmement dur
20	effort maximal

Tableau 1 : Echelle d'évaluation de l'effort perçu, Borg 1982 modifiée en 1988.

Cette échelle est une notation comprise entre 6 et 20, où comme l'on peut le voir sur le tableau 1, le 6 représente « aucune sensation d'effort » et 20 « l'effort maximal » (219).

L'échelle de temps limite (ETL) construite par Garcin et al., (220), peut être complémentaire à l'échelle de la perception de Borg, puisque l'échelle RPE concerne l'état actuel du sujet (c'est-à-dire à quel niveau de pénibilité il perçoit l'exercice entrepris), tandis que l'échelle ETL traite de la prédiction subjective de la durée qui pourrait être maintenue au niveau de l'état actuel du coureur.

20	
19	2 minutes
18	
17	4 minutes
16	
15	8 minutes
14	
13	15 minutes
12	
11	30 minutes
10	
9	1 heure
8	
7	2 heures
6	
5	4 heures
4	
3	8 heures
2	
1	Plus de 16 heures

Tableau 2 : Estimation du temps limite : ETL. « Combien de temps pourriez-vous tenir au maximum à cette intensité ? » (220).

L'ETL est une échelle logarithmique de base 2 allant de 1 à 20 où les nombres sont rattachés à des temps en heures ou en minutes (Tableau 1 d'après Garcin et al., (220)). La cotation 1 correspond à une intensité d'exercice pouvant être maintenue quasiment indéfiniment. Selon Garcin et al., (220) et Garcin et Billat (221), l'échelle ETL est significativement corrélée avec l'intensité de l'exercice (Figure 14), d'après Garcin et al., (220) et Coquart et al., (222), la fréquence cardiaque le serait aussi.

Les principes méthodologiques présentés pour l'échelle RPE peuvent également être déclinés pour l'échelle ETL (223). Les utilisations de l'échelle ETL sont multiples et variées (223) :

- travailler à une allure de course optimale à l'entraînement : proposition de temps de passage au tour en fonction de la performance prédite ; constituer des groupes de travail : classer les sportifs selon la valeur d'ETL annoncée à une même intensité relative d'exercice et les regrouper dans des groupes d'ETL similaires,

- évaluer l'état de forme du moment à l'aide de la prédiction de la performance lors d'un exercice de courte durée effectué en routine à intensité élevée,

- évaluer les effets d'un cycle d'entraînement : utilisation routinière au début et à la fin de la période d'entraînement pour évaluer les améliorations produites par le programme d'entraînement,

- sélectionner les sportifs susceptibles d'avoir de meilleures performances : ceux qui produisent les intensités d'exercice les plus élevées pour une valeur d'ETL donnée ou ceux qui renseignent une valeur d'ETL plus faible (i.e., qui pensent tenir plus longtemps) pour une intensité d'exercice donnée.

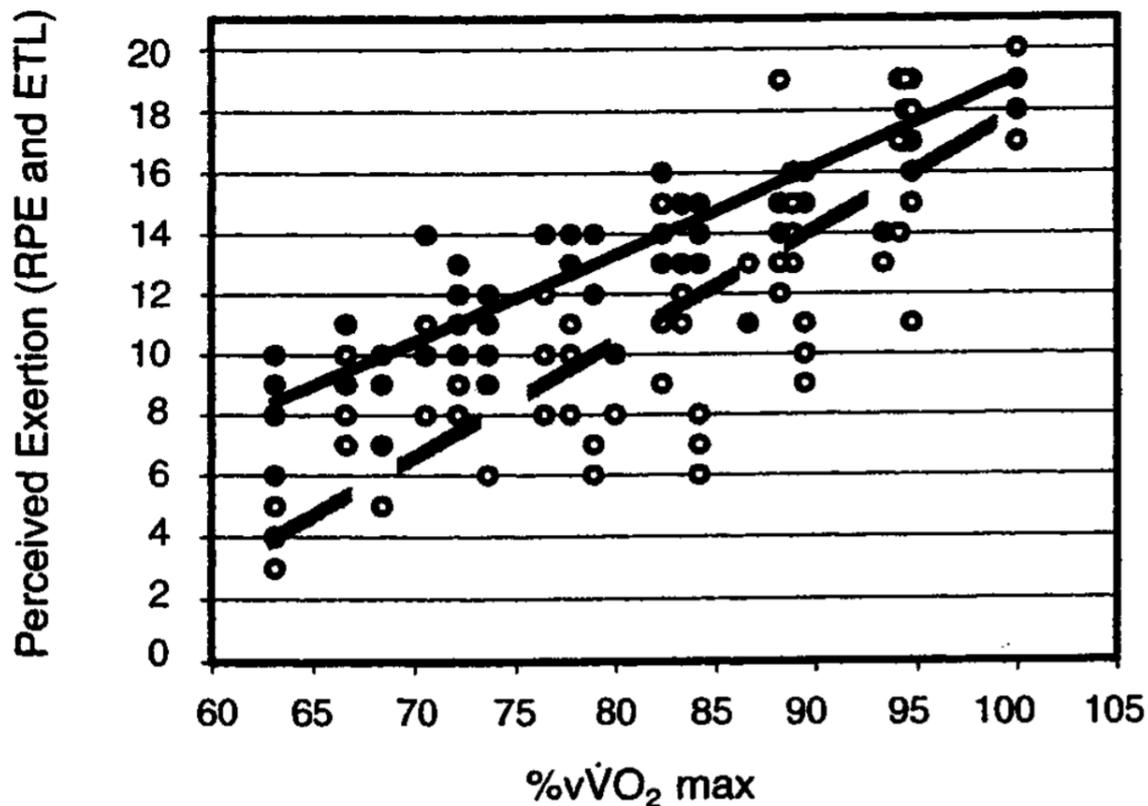


Figure 14 : Relation entre la perception de l'effort ([●], RPE de Borg, 1970, tableau 1) et l'estimation du temps limite ([○], ETL d'après Garcin et al., 1999, tableau 2) avec la vitesse exprimée en pourcentage de $\dot{V}O_{2max}$ durant un test incrémenté jusqu'à épuisement. - droite de régression [●], $r = 0,91$ et --- droite hachurée de régression [○], $r = 0,86$, respectivement (d'après Garcin et Billat, (221)).

L'Echelle de Borg est le plus souvent utilisée comme variable dépendante (mesurée) lors d'un test incrémenté (autrement appelé GXT pour Graded Exercise Test) où les participants donnent une estimation subjective de leur effort (224). Cependant, la conception de protocole la plus appropriée a fait l'objet d'un débat, et l'intérêt de concevoir de nouveaux protocoles en utilisant les perceptions vécues par les sujets pendant le test a fait surface en 2005 avec l'étude d'Eston et al., (224). Ces auteurs ont d'ailleurs créé un test d'effort à régulation perceptuelle (avec pour acronyme : PRET, Perceptually regulated exercise test). Un PRET consiste généralement en 4-5 étapes d'une durée de 2 à 4 min chacune, dans lesquelles la vitesse ou la puissance est régulée par des valeurs de RPE comprises entre 9, 11, 13, 15 et 17 (224–228). Eston et al., (2005) ont rapporté que le $\dot{V}O_{2max}$ atteint lors du PRET n'était pas significativement différente de celui d'un GXT, $48,6$ vs $48,8 \pm 7,1$ mL.kg⁻¹.min⁻¹, respectivement.

Lander et al., (213) ont démontré que les exercices auto-régulés (allure libre) étaient moins exigeants sur le plan physiologique que l'exercice incrémentés ou en rampe, probablement

parce que des augmentations d'intensité fixes sont un moyen non naturel de faire de l'exercice pour la plupart des athlètes comme la souligné Noakes (229).

Par la suite, une nouvelle méthode de détermination de $\dot{V}O_{2max}$ sur ergocycle permet aux sujets de travailler à leur propre allure tout en conservant une structure de test incrémenté. Ce test appelé SPV pour "Self paced $\dot{V}O_{2max}$ protocol", est composé de 5 paliers de 2 minutes à des intensités correspondantes à RPE 11, 13, 15, 17 et 20. Ce nouveau test fut comparé à un test incrémenté "classique" (230). Mauger et Sculthorpe ont démontré que ce SPV test produisait des valeurs de $\dot{V}O_{2max}$ nettement plus élevées que celles obtenues avec le GXT et que les sujets présentaient majoritairement un plateau de $\dot{V}O_{2max}$. Ce SPV test était développé sur cycloergomètre, il a depuis été utilisé sur tapis roulant (231–235). Dans la plupart de ces études en course à pied, les différents auteurs ne trouvent pas de différence entre $\dot{V}O_{2max}$ du SPV test et du GXT.

Par ailleurs, un SPV test sur tapis roulant motorisé est une alternative possible à un test incrémenté tout en produisant des valeurs de $\dot{V}O_{2max}$ similaires (236). Les vitesses maximales atteintes lors du SPV test peuvent être plus représentatives du sprint final atteint lors d'une course compétitive. Les résultats actuels montrent que l'exercice autorégulé peut, dans une certaine mesure, être réalisé sur un tapis roulant motorisé et peut même être plus efficace que sur un tapis roulant non motorisé où les mécanismes de course à pied sont trop différents de la course normale (237).

Lim et al., (238) ont étudié l'utilisation du SPV test sur le terrain. L'objectif principal de cette étude était d'évaluer la validité et la reproductibilité de ce test par rapport à un GXT, en faisant réaliser à des coureurs un GXT et trois SPV tests. Lim et al., en ont conclu que la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2max}$) dans le GXT n'était pas significativement différente ($63,5 \pm 10,1 \text{ mL.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$) de $\dot{V}O_{2max}$ pour les trois SPV tests, ($65,5 \pm 8,7$, $65,4 \pm 7,0$ et de $66,7 \pm 7,7 \text{ mL.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$), sans effet de familiarisation observée entre les trois tests ($ICC = 0,80$; $SEM = 3,16 \text{ mL.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$) avec une différence moyenne de $1,8 \text{ mL.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ entre les trois tests sur le terrain (238). Ce test sur le terrain est donc une méthode fiable pour la détermination de $\dot{V}O_{2max}$, puisque ce test serait plus représentatif de la course naturelle, conformément aux recommandations de Noakes (229).

Comme nous venons de l'étayer, l'allure de l'effort peut être définie comme l'auto-régulation de la vitesse et de la puissance pendant l'exercice (239). Comme la gestion de l'allure est impliquée dans toutes les compétitions, il est important que les athlètes et les entraîneurs comprennent sa réglementation. Selon le modèle de performance d'endurance, plusieurs équipes

de recherche pensent que l'allure de course est régulée soit consciemment (209, 231, 232) soit inconsciemment (242) par le système nerveux central.

Récemment, dans la littérature, il a été établi que la régulation de l'allure était consciente, et de ce fait, l'allure est maintenant étudiée comme une réponse comportementale basée sur un processus décisionnel qui peut être influencé à la fois par des facteurs internes (p. ex. perception de l'effort, réactions physiologiques) et externes (proximité ou non de l'adversaire, commentaires d'entraîneurs ou jury de compétition, etc.) (209, 234).

Le fait que la perception de l'effort est un régulateur de la performance d'endurance est également corroboré par son rapport à l'épuisement. En effet, selon Pageaux (218), pour les sujets très motivés, la perception de l'effort est toujours perçue comme maximale lorsqu'il y a désengagement volontaire. Fait intéressant, bien que la fatigue musculaire joue un rôle indirect dans l'augmentation de la perception de l'effort, un décalage a été démontré entre l'augmentation de la fatigue musculaire et la perception de l'effort. Cette inadéquation confirme que la fatigue musculaire n'est pas un facteur limitant mais déterminant de la performance d'endurance, et que d'autres facteurs que la fatigue musculaire sont impliqués dans l'augmentation de la perception de l'effort pendant l'exercice d'endurance.

4 Conclusion de l'introduction à la contribution personnelle

Nous avons montré que les facteurs limitants de l'exercice que sont $\dot{V}O_{2max}$, l'acidose, la puissance et la perception de l'exercice ne doivent pas être considérés de façon séparée mais dans leur ensemble grâce à des protocoles écologiques en situation réelle dans lesquels l'effort est contrôlé par la perception et/ou les variables de puissance et/ou énergétiques. Cette thèse s'inscrit dans la continuité d'une telle démarche introduite dans la thèse CIFRE (Conventions Industrielles de Formation par la Recherche) de Thomas Carbillet réalisée précédemment dans la même entreprise (BillaTraining®) afin de fournir un algorithme d'entraînement personnalisé intégrant ces 5 facteurs (244). Nous allons donc apporter des éléments à la compréhension des facteurs de contrôle sur les réponses cardio-respiratoires lors d'un nouveau test d'évaluation et sur la performance en course à pied.

Nous allons successivement étudier l'effet de la variable de contrôle :

- perception (RPE, article 1)
- distance (du 100m au 10 km, article 2)
- physiologiques (FC, $\dot{V}O_2$) comparées à vitesse libre et constante (article 3).

CHAPITRE 2 : CONTRIBUTION PERSONNELLE

1 Objectifs scientifiques de cette thèse

L'objectif de cette thèse est d'étudier les effets des variables de contrôle que sont notamment la perception de l'effort, la distance, la vitesse, FC et $\dot{V}O_2$ sur les capacités cardio-respiratoires lors d'un nouveau test d'évaluation et sur la performance en course à pied. En effet, historiquement la physiologie de l'exercice a joué un grand rôle dans la compréhension des limites physiologiques de l'Homme à l'effort alors que les valeurs cardio-respiratoires de référence de l'Homme « normal » furent celles de repos. La physiologie de l'exercice a recherché les valeurs humaines les plus élevées en soumettant l'Homme à des puissances d'exercices sur des durées croissantes et a élaboré des seuils de puissances d'exercice caractéristiques en fonction des réponses physiologiques. Enfin, notre contribution sera de rendre cette approche plus écologique, étant donné que nous n'imposons pas directement de puissance (vitesses). En effet, nous étudions les réponses physiologiques selon la perception de la pénibilité de l'exercice (échelle de Borg (8)) avec un protocole (Test RABIT[®]) modifiant la durée de l'effort en fonction des niveaux de perception demandés. L'intensité de l'effort est certes toujours contrôlée mais elle s'en remet au ressenti qui intègre l'ensemble des variables physiologiques intégrées et analysées par le cerveau. Nous vérifierons la stabilité des réponses physiologiques selon l'intensité demandée mais également selon la durée estimée (article 1). Ensuite, nous étudierons les réponses physiologiques en fonction de la distance de course, sachant que cette variable de contrôle correspond à la mise en situation de la performance maximale en course à pied. En effet, la performance revient à rechercher le temps minimum pour parcourir une distance donnée dont le coureur a connaissance par avance (article 2). Nous allons ainsi comparer des réponses physiologiques sur des distances de courses correspondant à des efforts de différents types. Par exemple, les 100-200m peuvent être assimilés à du « all-out » (un effort total, autrement dit les sujets doivent atteindre leur puissance/vitesse de pointe le plus rapidement possible dès le début du test et la maintenir aussi élevée que possible), et les 800-1500m sont « semi-contrôlés » puisque le coureur connaît ses temps de passage et opère stratégiquement selon des référentiels de seuils de vitesse comme la vitesse au seuil lactique vulgarisée sur les sites de coaching et de conseil en ligne. Nous verrons que cette stratégie d'hyper-contrôle de la vitesse n'est peut-être pas optimale si l'on s'en réfère, justement, à la perte de contrôle après le fameux mur du marathon au trentième kilomètre. C'est alors que nous aborderons la possibilité de s'en remettre à un contrôle « physiologique » afin d'éviter que le sujet s'oblige à contrôler sa vitesse selon un référentiel non fondé. Nous aborderons les réponses physiologiques et de vitesses en fonction

des variables physiologiques isolées de façon alternative (FC, $\dot{V}O_2$) comparée à la vitesse constante ou libre (article 3).

2 Méthodologie

2.1 Sujets

Tous les participants sont volontaires pour participer aux études et déjà familiarisés avec les tests de $\dot{V}O_{2max}$. Les objectifs et les procédures des études expérimentales ont été approuvés par le comité d'éthique CPP Sud-Est V, Grenoble, France ; référence : 2018-A01496-49. Tous les participants ont reçu des informations sur l'étude et ont donné leur consentement écrit à la participation.

2.2 Les tests de $\dot{V}O_{2max}$: épreuves d'efforts cardio-pulmonaires

2.2.1 Le test de l'Université de Montréal (UMTT)

L'UMTT est réalisé sur une piste de 400 m avec des cônes placés tous les 20 mètres. Une bande son préenregistrée indiquait (en utilisant des bips sonores) le moment où le sujet devait passer près d'un cône pour maintenir la vitesse imposée. Un son plus long marquait un incrément de vitesse. La vitesse du premier palier était fixée à 8,5 km.h⁻¹ pendant 2 minutes, puis toutes les minutes, la vitesse était incrémentée de 0,5 km.h⁻¹. Lorsque le sujet était incapable de maintenir l'allure de course imposé et ne parvenait donc pas à atteindre le cône à temps pour le bip sonore à deux occasions consécutives, le sujet était considéré comme épuisé, et le test était terminé. La vitesse correspondant au dernier palier « terminé » a été enregistrée en tant que $v\dot{V}O_{2max}$ (km.h⁻¹).

2.2.2 Le test RABIT[®]

Ce test « self-paced $\dot{V}O_{2max}$ » (SPV) de 20 minutes comprenait trois paliers de course à pied, ajustés à des perceptions de l'effort (RPE) équivalentes à « léger » (RPE 11) pendant 10 min, « ni léger, ni dur », (RPE 14) pendant 5 min et « très dur » (RPE 17) pendant 3 min (Figure 15). Chaque palier était suivi d'une période de repos d'une minute. Les participants ont été priés de modifier leur vitesse de course en fonction du RPE prescrit, afin que leur RPE (et

non leur vitesse) reste constant pour chaque palier. Le test a été effectué à l'extérieur, sur un chemin de terre dure.

Le participant pouvait consulter l'échelle RPE à des intervalles réguliers (c'est-à-dire tous les 100 m) car il/elle était suivi(e) par l'expérimentateur à vélo. Un test de vérification a été réalisé jusqu'à épuisement volontaire à une intensité de course perçue comme supérieure à la vitesse pic atteinte lors du dernier palier du RABIT® (79). Les critères de vérification étaient un pic de consommation d'oxygène et de fréquence cardiaque de $\pm 2\%$ entre la phase de vérification et à la dernière phase incrémentielle du test (72,78).

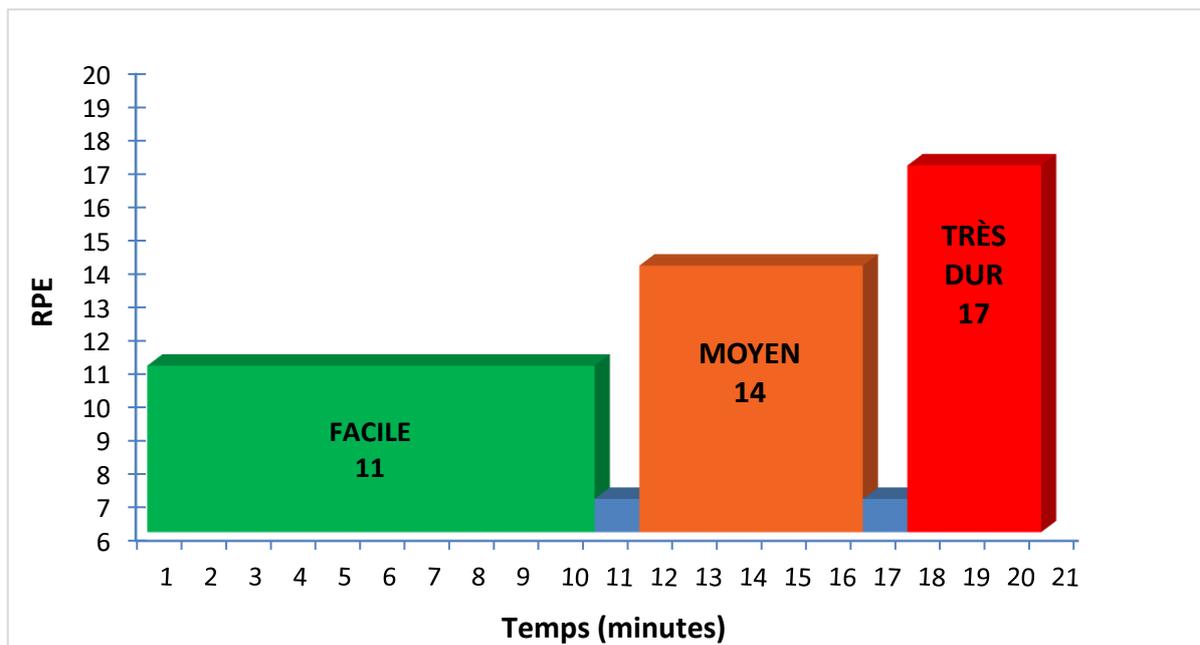


Figure 15 : Représentation schématique du protocole RABIT®.

2.3 Performance

Les participants réalisent la distance de leur choix en fonction de leur spécialité entre le 100, 200, 800, 1500, 3000-m et 10 kilomètres. Nous avons demandé à tous les participants de réaliser la meilleure performance, c'est-à-dire de courir aussi vite que possible selon leur propre stratégie de course.

2.4 3000 m avec consignes différentes

Les sujets ont effectué, individuellement, quatre courses de 3000 m avec des instructions différentes. Les tests ont été répétés au même moment de la journée (± 2 heures) avec un intervalle de récupération variant entre 3 et 7 jours. Les sujets ont été invités à s'abstenir

d'entraînement 24 heures avant chaque test. Les quatre tests ont été réalisés sur une piste extérieure d'athlétisme.

2.4.1 Conditions de tests

Le premier essai (Time Trial 1, TT1) - 3000 m libre. TT1 est une course libre de 3000 m. Nous avons demandé à tous les participants de courir aussi vite que possible selon leur propre stratégie de course et le temps total de la course a été mesuré à l'aide d'un chronomètre.

Ce premier essai était un essai de référence visant à établir les paramètres de contrôle des trois tests suivants. Les tests restants ont été effectués dans un ordre aléatoire. Le deuxième essai (TT2) – 3000 m à vitesse constante, c'est-à-dire, une vitesse imposée correspondant à la vitesse moyenne de la course TT1. Le troisième essai (TT3) - 3000 m à $\dot{V}O_2$ constant, le $\dot{V}O_2$ imposé correspondait à la valeur moyenne de $\dot{V}O_2$ durant TT1. Le quatrième essai (TT4) - 3000 m à FC constante, la FC imposée correspondait à la FC moyenne de la course TT1.

Afin de contrôler les états stables des tests 2, 3 et 4, le système de télémétrie longue portée du K5 (Cosmed®, Rome, Italie) a été utilisé. L'opérateur situé au centre de la piste reçoit instantanément les données du K5 et du système Garmin (montre et cardiofréquencemètre) sur son ordinateur portable. Il peut alors demander au coureur d'augmenter, de diminuer ou de maintenir sa vitesse afin de maintenir stable la variable choisie. Pour contrôler le maintien de la vitesse constante (TT2), ajouté au contrôle de l'expérimentateur, le coureur disposait de la vitesse et des bips sonores qui avaient été programmés afin de lui indiquer si sa vitesse dérivait de $\pm 5\%$ comparée à la vitesse imposée demandée.

2.5 Variables analysées

2.5.1 Mesurées

Les échanges gazeux respiratoires ($\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, \dot{V}_E , QR) ont été mesurés en cycle à cycle continus à l'aide d'un système portable (K5, Cosmed, Rome, Italie). Une montre GPS (système de positionnement global) complétée par un cardiofréquencemètre avec ceinture pectorale (Garmin, Olathe, Kansas, États-Unis,) appariée au K5, été utilisée pour mesurer la FC et la vitesse de course (en utilisant des moyennes de données sur 5 secondes) tout au long de chaque test d'exercice. Les participants ont été habitués à l'échelle 6-20 du RPE de Borg (Tableau 1, Chapitre 1, partie 6 de ce manuscrit), c'est-à-dire qu'ils ont appris que les valeurs numériques

étaient associées aux définitions écrites correspondantes de l'échelle (par exemple, le RPE 20 équivaut à un « très très dur »).

2.5.2 Calculées

2.5.2.1 La production d'énergie (étude 2)

La production d'énergie peut être exprimé en $J.s^{-1}.kg^{-1}$ en prenant en compte l'équivalent énergétique du litre d'oxygène exprimé en $kJ.L^{-1}$ dont la valeur dépend du substrat utilisé comme source d'énergie. Pour une consommation exclusive de substrats glucidiques, le quotient respiratoire est de 1,0 et l'équivalent énergétique est égal à $21,1 kJ.L^{-1}$.

Les différents paramètres (ci-dessous) ont été calculés par la méthode du déficit accumulé en O_2 de D.Hill 1996 et D.Hill et al., 1998 (245,246) :

- L'énergie aérobie ($E_{aérobie}$ en $J.s^{-1}.kg^{-1}$),

$$\sum \frac{\dot{V}O_2}{60} \times 21,1 \quad \text{Eq. 13}$$

- Estimation de $\dot{V}O_2$ requis/demandé (en $J.s^{-1}.kg^{-1}$), :

$$\frac{\left(\frac{\dot{V}O_{2max}}{v\dot{V}O_{2max}} \right)}{60} \times v \times t \times 21,1 \quad \text{Eq. 14}$$

- L'énergie anaérobie ($E_{anaérobie}$ en $J.s^{-1}.kg^{-1}$),

$$\sum \left(\frac{\left(\frac{\dot{V}O_{2max}}{v\dot{V}O_{2max}} \times v \right) - (\dot{V}O_2)}{60} \right) \times t \times 21,1 \quad \text{Eq. 15}$$

- L'énergie totale (E_{tot} en $J.s^{-1}.kg^{-1}$), a été calculé comme suit :

$$\sum E_{aérobie} + \sum E_{anaérobie} \quad \text{Eq. 16}$$

Équation 13, 14, 15, 16 : Où, « v » est la vitesse moyenne de la course ($km.h^{-1}$), $v\dot{V}O_{2max}$ est la vitesse associée à $\dot{V}O_{2max}$ au cours de l'UMTT ($km.h^{-1}$), $\dot{V}O_2$ est la consommation d'oxygène moyenne ($mL.kg^{-1}.min^{-1}$), $\dot{V}O_{2max}$ est la consommation maximale d'oxygène ($mL.kg^{-1}.min^{-1}$), et t est le temps réalisé en seconde sur la distance parcourue (mètres).

- L'énergie à $\dot{V}O_{2max}$ ($E@ \dot{V}O_{2max}$ en $J.s^{-1}.kg^{-1}$), a été calculé en tant que :

$$\sum E_{aérobie} \times T_{lim@ \dot{V}O_{2max}} \quad \text{Eq. 17}$$

Équation 17 : Où, $E@ \dot{V}O_{2max}$ est la production d'énergie à $\dot{V}O_{2max}$ ($J.s^{-1}.kg^{-1}$), $T_{lim@ \dot{V}O_{2max}}$ est le temps passé à la consommation maximale d'oxygène lors de la course et $\dot{V}O_{2max}$ est la consommation maximale d'oxygène de l'UMTT ($mL.kg^{-1}.min^{-1}$).

2.5.2.2 Le coût énergétique et coût cardiaque de course (étude 3)

- Le coût en oxygène ($mLO_2.kg^{-1}.m^{-1}$) est calculé comme le rapport entre la consommation d'oxygène ($mLO_2.kg^{-1}.min^{-1}$) et la vitesse ($m.min^{-1}$).
- Le coût cardiaque ($m.battements^{-1}$) est le rapport entre la vitesse de course et la fréquence cardiaque, moyennées toutes les 5 secondes. Ce rapport exprime la distance (m) parcourue à chaque battement qui peut être interprétée comme un coût cardiaque de course (247).

2.5.2.3 Distribution de la vitesse (étude 3)

1. **Le tau de Kendall** (τ) caractérise la tendance des réponses physiologiques et de la vitesse au cours des courses (248,249).

Le τ de Kendall est un coefficient non paramétrique qui permet de détecter une tendance dans une série de valeurs. Il est calculé à partir d'une série temporelle v_1, v_2, \dots, v_n . Ici v_i est la

$i^{\text{ème}}$ valeur d'une vitesse, $i < j$ signifiant que i indique une période de temps avant j . Par exemple la vitesse v augmente avec le temps si $v_1 < v_2 < \dots < v_n$.

$$K(v_j, v_i) = K(v_i, v_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } i < j \text{ et } v_i < v_j, \\ 0 & \text{si } v_i = v_j, \\ -1 & \text{si } i < j \text{ et } v_i > v_j. \end{cases} \quad \text{Eq. 18 a}$$

$$\tau = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i < j} K(v_i, v_j) \quad \text{Eq. 18 b}$$

Équation 18 : Calcul du τ de Kendall.

Le τ de Kendall est défini par l'équation (18.b), la somme étant effectuée sur les $n(n-1)/2$ couples d'indices $\{i, j\}$ distincts, non ordonnés, de sorte que τ prend des valeurs entre $[-1, 1]$. Le τ de Kendall est égal à 1 seulement si la série temporelle de vitesse augmente. De plus, une série temporelle à vitesse constante conduit à la valeur $\tau = 0$. Ce test est robuste et non paramétrique (250). Un τ de Kendall positif indique que la variable analysée suit une tendance globalement croissante au cours de l'exercice. À l'inverse, un τ de Kendall négatif indique une tendance décroissante (164,244).

2. Le comportement asymétrique de la distribution de vitesse sur toute une course (étude 3).

L'asymétrie correspond à la distribution d'une variable autour de sa moyenne. L'asymétrie se calcule selon Pearson, comme la différence entre la moyenne et le mode de la course que divise l'écart type.

Une asymétrie positive, signifie que la moyenne est supérieure à la médiane, tandis qu'une asymétrie négative signifie que la moyenne est inférieure à la médiane (Figure 16). À partir de cette méthode nous calculons, le temps passé en dessous vs. le temps passé au-dessus de la vitesse moyenne de la course, pour chaque coureur, dans chaque situation de course (164,244).

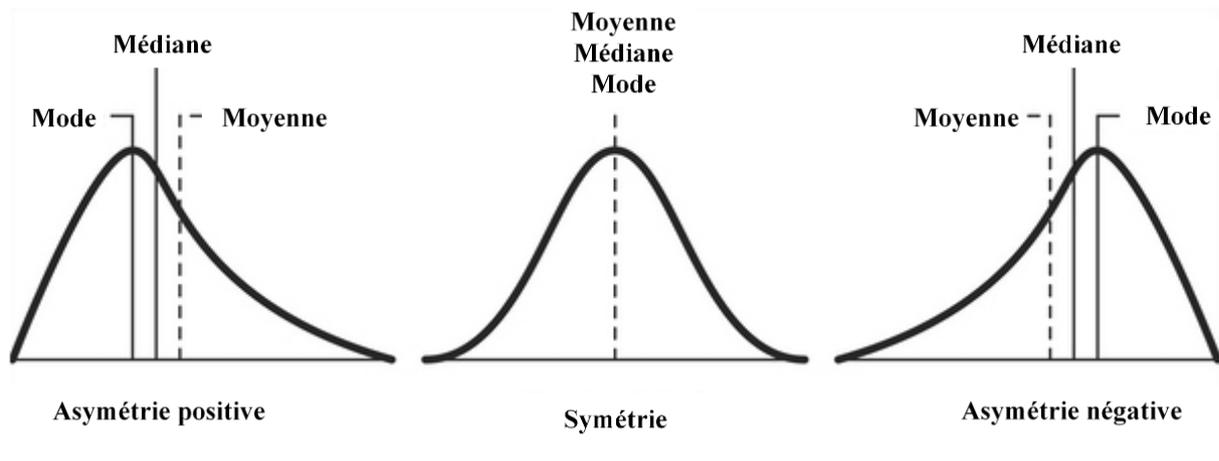


Figure 16 : Exemples des différents comportements asymétriques d'une distribution de données existantes (traduite, d'après Lion., (251))

3 Résultats : Etudes expérimentales

L'objectif général de cette thèse est de contribuer à la compréhension des effets des variables de contrôle que sont notamment le temps (la durée), l'intensité et la distance sur les réponses physiologiques et la performance en course à pied. Historiquement, comme nous avons pu le détailler dans le chapitre 1, les physiologistes de l'exercice étudiaient les réponses physiologiques en fonction de la vitesse de course en introduisant des paliers indépendants jusqu'à ce que le sujet arrive à épuisement. De ces protocoles est née la notion de $\dot{V}O_{2max}$.

A partir de ce $\dot{V}O_{2max}$, les équipes de recherches ont analysé avec méthode les facteurs limitants du $\dot{V}O_{2max}$. En effet, les situations protocolaires ont varié, avec des tests sur tapis roulant, soit rectangulaires, soit triangulaires ou encore intermittents. Ces études sur les facteurs limitants de $\dot{V}O_{2max}$, ont permis de mettre en évidence des notions clés comme le coût énergétique, le seuil lactique (transition énergétique aérobie/anaérobie), la vitesse associée à $\dot{V}O_{2max}$ (vitesse maximale aérobie, qui détermine les intensités d'exercice et prédit la performance) ou bien la puissance critique (plus haute intensité d'exercice qui peut être maintenue dans un état de stabilité physiologique). Seulement, tous ces protocoles permettant d'atteindre $\dot{V}O_{2max}$ et auxquels on associe des notions, sont fondamentalement limitants.

Ces dernières années la notion de central gouverneur (le cerveau joue le rôle de régulateur de l'effort) a commencé à remettre en cause cette collection de situations protocolaires focalisée autour de $\dot{V}O_{2max}$. Ainsi les signaux qualifiant un exercice très intense, comme l'hyperventilation, le seuil lactique, la douleur musculaire et une fréquence cardiaque élevée seraient intégrés comme un unique signal au niveau du cerveau, ce qui engendrerait l'arrêt de l'effort pour éviter une « catastrophe » physiologique. C'est pourquoi, les chercheurs ont remodelé les protocoles de laboratoire en préconisant la perception comme variable d'entrée (variable indépendante). Néanmoins, utiliser la perception sans tenir compte de la réalité du terrain ni de la durée qui pourrait être maintenue à un RPE donné ne permet pas d'évaluer pleinement les capacités des sujets. Nous avons donc souhaité à travers notre première étude, étudier si à une consigne de perception donnée le coureur peut associer une réponse physiologique et/ou de vitesse reproductible suffisamment sensible pour distinguer des intensités facile, moyenne et dure, avec des durées différentes, tout en atteignant son « vrai » $\dot{V}O_{2max}$.

3.1 Les coureurs de loisir sont capables de réguler leurs réponses physiologiques et leurs vitesses en fonction de l'intensité et de la durée des paliers, allant des zones d'entraînement sous-maximales à maximales.

3.1.1 Résumé

La présente étude avait pour but de valider un nouveau test de $\dot{V}O_{2max}$, sur le terrain, régulé de manière perceptuelle (Running Advisor Billat Training, RABIT[®]), qui permet aux coureurs de loisir de définir des zones d'entraînement personnalisées. Douze coureurs de loisir masculins et féminins (moyenne \pm écart type : 43 ± 8 ans) ont effectué trois tests d'exercices maximaux (deux tests RABIT[®] et un test de l'Université de Montréal (UMTT)). Le test UMTT est un test incrémental continu avec un incrément de $0,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ toutes les minutes jusqu'à épuisement. Les tests RABIT[®] ont été réalisés à des intensités de 11, 14 et 17 sur l'échelle d'évaluation de l'effort perçu (RPE) pendant 10, 5 et 3 min, respectivement, avec un repos d'une minute entre chaque effort. Résultats : Les deux tests RABIT[®] et l'UMTT ont donné des valeurs moyennes \pm SD de $\dot{V}O_{2max}$ non significativement différentes (respectivement $53,9 \pm 6,4$, $56,4 \pm 9,1$ et $55,4 \pm 7,6 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, $p = 0,722$). Les réponses cardiorespiratoires et de vitesse étaient reproductibles en fonction de l'intensité de la course (RPE : 11, 14 et 17) et du temps relatif pour chaque palier de RPE. En effet, les valeurs de $\dot{V}O_2$, FC, \dot{V}_E et de vitesse ne différaient pas significativement lorsque la durée était exprimée en durée relative de 30%, 60% ou 90% (soit à 3, 6 et 9 min d'un effort de 10 min à RPE 11) ($p = 0,997$). Conclusions : nos résultats actuels démontrent que le test RABIT[®] est une méthode fiable pour définir les zones d'entraînement sous-maximales et maximales chez les coureurs de loisir.

Ce travail fait l'objet d'un article accepté à l'International Journal of Sports Physiology and Performance le 23 septembre 2019. Il a également fait l'objet d'une présentation plénière au 4ème congrès de Médecine de sport de Rabat au Maroc en Mai 2018 et d'un poster débattu au Congrès européen de l'European College of Sport Science à Prague en Juillet 2019.

3.1.2 Article 1

1. *Title of the article:*

Determination of submaximal and maximal training zones from a 3-stage, variable duration perceptually-regulated track test

2. *Submission type* : Original Investigation

3. *Full names of the authors and institutional/corporate affiliation:*

C. Molinari¹, F. Palacin³, L. Poinard³ and V. L. Billat^{2,3}

1. UBIAE, Université d'Evry, Université Paris-Saclay, F-91025 Evry, France

2. Université d'Evry, Université Paris-Saclay, F-91025 Evry, France

3. Université de Paris, Université Paris Descartes, Paris, France.

4. *Contact details for the corresponding author:* Véronique Billat, Université d'Evry, Université Paris-Saclay, F-91025 Evry, France, and Sorbonne Paris Cité, Université Paris Descartes, Paris, France. veroniquelouisebillat@gmail.com

5. *Preferred running head.* Self-paced test in recreational runners

ABSTRACT

Purpose: The present study sought to validate a new perceptually-regulated, self-paced maximal oxygen consumption ($\dot{V}O_{2max}$) field test (the Running Advisor Billat Training test (RABIT[®])) that can be used by recreational runners to define personalized training zones. **Design:** In a cross-sectional study, male and female recreational runners (n=12; mean \pm standard deviation (SD) age: 43 \pm 8) completed three maximal exercise tests (two RABIT[®] tests and a University of Montreal Track Test (UMTT)), with a 48-hour interval between tests. **Methods:** The UMTT was a continuous, incremental track test with a 0.5 km.h⁻¹ increment every minute until exhaustion. The RABIT[®] tests were conducted at intensities of 11, 14 and 17 on the rating of perceived exertion (RPE) scale for 10, 5 and 3 min, respectively, with a 1 min rest between each effort. **Results:** The two RABIT[®] tests and the UMTT gave similar mean \pm SD $\dot{V}O_{2max}$ values (53.9 \pm 6.4, 56.4 \pm 9.1

and $55.4 \pm 7.6 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, respectively, $p=0.722$). The cardiorespiratory and speed responses were reliable as a function of the running intensity (RPE: 11, 14, and 17) and the relative time point for each RPE stage. Indeed, the VO_2 , HR, VE and speed values did not differ significantly when the running time was expressed as a relative duration of 30%, 60% or 90% (i.e. at 3, 6, and 9 min of a 10 min effort at RPE 11) ($p=0.997$). **Conclusions:** Our present results demonstrated that the RABIT[®] test is a valid method for defining submaximal and maximal training zones in recreational runners.

Keywords: oxygen uptake, rating of perceived exertion, maximal aerobic capacity, field exercise, perceptual regulation.

INTRODUCTION

Every year, the New York, London, Berlin and Paris marathons each attract around 30 to 50,000 adult runners of all levels. Most of these runners are recreational athletes. Many train alone, and hope to progress by monitoring their heart rate and/or running speed (rather than their perceived exertion, for example). Recreational runners often define their training zones with reference to the estimated running speed associated with their maximal level of oxygen consumption ($v\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$) or their maximal heart rate (HR_{max})^{1,2}. Some runners train with a coach, who can measure the HR_{max} and $v\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$ in an incremental protocol like the University Montreal Track Test (UMTT)³ - the current reference for calibrating high-intensity interval training or tempo training⁴. However, this form of training (based on two physiological parameters) does not take into account psychological parameters that can be of value in defining training loads for marathon runners⁵. With regard to exercise testing and prescription, the psychological component of how “hard” or “easy” people perceive a physical effort to be was first emphasized by Gunnar Borg in the 1960s⁶. Since then, a large body of literature data has demonstrated the reliability of perceptually regulated $\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$ tests⁷. Furthermore, applications of Borg’s Rating of Perceived Exertion (RPE) scale have been included in mainstream guidelines for exercise testing and prescription⁸. Furthermore, Ceci and

Hassmen (1991)⁹ showed that runners were able to self-adjust their running intensity at three different RPE values, with an RPE of 11 (“light” on a 6-20 Borg scale) for 3 minutes, 13 (“somewhat hard”) for 11 minutes, and 15 (“hard”) for 5 minutes. However, effort duration has an effect on physiological responses and the RPE during self-paced interval training⁴. Lastly, many runners (especially recreational runners and beginners) do not use the RPE scale to monitor their training zones. Thus, the development and evaluation of an easy-to-use, self-paced $\dot{V}O_{2max}$ (SPV) field test would show that verbal communication is a novel means of defining training zones and thus producing a more precise, accurate training plan¹⁰. Hence, we decided to test the effect of exercise duration on the cardiorespiratory and speed responses in SPV protocols.

The primary objective of the present study was to validate a new field-based SPV test (the Running Advisor Billat Training (RABIT[®]) test) that recreational runners can easily use to reach their $\dot{V}O_{2max}$ and thus define their training zones. The RABIT[®] test was adapted from Ceci and Hassmen’s (1991)⁹ protocol, which requires the participant to perform three bouts of exercise only. To this end, we measured the reliability of cardiorespiratory and speed responses as a function of the running intensity (RPE: 11, 14, and 17) and duration (at 30%, 60%, and 90% of each stage).

Subjects

Twelve healthy adult recreational runners (8 men and 4 women; mean \pm standard deviation (SD) age: 43 ± 8 ; weight: 69 ± 12 kg; height: 1.74 ± 0.9 m) familiar with $\dot{V}O_{2max}$ testing volunteered to participate in the study. Participants performed each exercise test in random order, with a 48-hour interval between tests. The study’s objectives and procedures were approved by an independent ethics committee (CPP Sud-Est V, Grenoble, France; reference: 2018-A01496-49). All participants were provided with study information and gave their written consent to participation.

METHODS

All participants completed an UMTT and two self-paced $\dot{V}O_{2\max}$ tests (RABIT[®]1 and RABIT[®]2) in a randomized, counterbalanced order 2 to 7 days apart. During the 48 h recovery period between tests, participants were told to refrain from any training activities. Respiratory gases (oxygen uptake [$\dot{V}O_2$], ventilation [$\dot{V}E$], and the respiratory exchange ratio [RER]) were continuously measured using a portable breath-by-breath sampling system (K5, Cosmed, Rome, Italy). A global positioning system (GPS) watch (Garmin, Olathe, Kansas, United-States) was used to measure the heart rate and the pacing response (using 5 s data averages) throughout each exercise test. Participants were perceptually anchored to the Borg's 6-20 RPE scale, i.e. they were told that the numerical values equated to the feelings associated with the scale's corresponding written definitions (e.g. RPE 20 equates to 'maximal exertion'). During the UMTT, $\dot{V}O_{2\max}$ was confirmed by a visible plateau in oxygen consumption ($\leq 2 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) with a standard increment in exercise intensity, and/or any indicative secondary criteria (visible signs of exhaustion; $\text{HR}_{\max} \pm 10 \text{ beats}\cdot\text{min}^{-1}$; $\text{RER} \geq 1.15$) around the point of volitional exhaustion¹¹. The $\dot{V}O_{2\max}$ value determined in the UMTT (a graded exercise test) was checked using a verification stage¹². Given the RABIT[®]'s design the highest $\dot{V}O_{2\max}$ measurement was taken as the $\dot{V}O_{2\max}$ - independently of changes in running speed¹⁰.

The UMTT

The UMTT was conducted on a 400 m track with cones placed every 20 m. A pre-recorded soundtrack indicated (using sound beeps) the moment when the subject had to pass near a cone to maintain the imposed speed. A longer sound marked a speed increment. The first step was set to $8.5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, with a subsequent increment of $0.5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ every minute. When the subject was unable to maintain the imposed running pace and thus failed to reach the cone in time for the beep on two consecutive occasions, the test was over. The speed corresponding to the last completed step was

recorded as the $\dot{V}O_{2\max}$ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$). The test's mean \pm SD total duration in the present study was 920 ± 220 seconds.

The RABIT[®] test

This 21-minute SPV test comprised three incremental exercise stages, adjusted to a prescribed RPE equating to “light” (RPE 11) for 10 min, “somewhat hard” (RPE 14) for 5 min, and “very hard” (RPE 17) for 3 min. Each step was followed by a 1-minute rest period. Participants were instructed to modify their running speed on a moment-to-moment basis in line with the prescribed RPE (rather than the end-point of the task), so that their RPE (not their speed) remained constant for each stage. The test was conducted outdoors, on a hard dirt path. The RPE scale could be viewed by the participant at regular intervals (*i.e.* every 100 m) because he/she was followed by the investigator on a bike. A verification test was performed to volitional exhaustion at a running intensity perceived to be higher than the peak speed attained during the last stage of the RABIT^{®13}. The verification criteria were a peak oxygen uptake $<2\%$ higher in the verification phase than the incremental phase value, and the peak heart rate^{14,15}.

Statistical analysis

All statistical analyses were performed using XLSTAT software (version 2019.1.1, Addinsoft, Paris, France). All the test variables ($\dot{V}O_2$, RER, HR, speed, and pace) were quoted as the mean \pm SD. Breath-by-breath data ($\dot{V}O_2$, $\dot{V}E$, RER) and HR data from the three tests were averaged into 15 s bins prior to analysis. For each variable, the normality and homogeneity of the data distribution were examined in a Shapiro-Wilk test. A one-way analysis of variance (ANOVA) was applied to assess the validity and reproducibility of the maximal physiological responses ($\dot{V}O_2$, HR, RER and $\dot{V}E$) and speed responses (peak, mean and end speeds) within each RPE stage for the two RABIT[®] tests and verifications phases. When significant differences were detected, a Holm-Sidak test was used to identify the source (*i.e.* RABIT^{®1} or RABIT^{®2}). A Bland and Altman

95% limits-of-agreement (LoA) analysis¹⁶ was used to quantify the agreement (bias \pm random error [$1.96 \times SD$]) between the $\dot{V}O_{2max}$ values measured in each test. Once the reproducibility of the data from the two RABIT[®] tests had been confirmed, we compared the RABIT[®] data with the UMTT in an ANOVA ($\dot{V}O_2$, HR, RER and $\dot{V}E$) and in an ANOVA – a rank test (peak and mean speeds). Pearson's coefficient (r) was used to qualify the correlation between the UMTT and the RABIT[®] test as low ($r= 0.30 - 0.50$), moderate ($r=0.50 - 0.70$) or high and very high ($r= 0.70 - 1.00$).

Next, we processed the data for testing the effect of the relative exercise duration on the cardiorespiratory and speed responses at each RPE stage. We normalized the duration of the stage on a relative scale (T1, T2, and T3) for comparing the time effect according to the RPE. A multivariate ANOVA was then used to gauge the reliability of the cardiorespiratory and speed responses as a function of the intensity (*i.e.* RPE 11, 14, 17) and the relative duration (*i.e.* 30%, 60% and 90% of each stage duration). Based on the effect size ($d_z = 0.88$) and the mean \pm SD $\dot{V}O_{2max}$ ¹⁷, we calculated that minimum sample size of $n = 12$ would be required to achieve a statistical power of 80% and alpha risk of 0.05.

RESULTS

Concurrent validity of the maximal values: UMTT vs. RABIT[®]1 & RABIT[®]2 (Figure 1;

Table 1)

The $\dot{V}O_{2max}$, maximal HR and maximal RER measured during the three-minutes “hard” part of the two RABIT[®] tests did not differ significantly from the corresponding values measured during the UMTT (Table 1). For the $\dot{V}O_{2max}$ derived from the UMTT, RABIT[®]1 and RABIT[®]2 tests, the corresponding intraclass correlation coefficient and 95% LoA were 0.87 and $1.5 \pm 9.23 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (UMTT vs. RABIT[®]1), and 0.74 and $1.07 \pm 14.89 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (UMTT vs. RABIT[®]2).

The Pearson's correlation coefficients for the UMTT vs. the RABIT[®] tests for $\dot{V}O_{2max}$, $\dot{V}E_{max}$, HR_{max} and maximal running speed were respectively $r=0.79$ ($p=0.002$)/ $r=0.60$ ($p=0.039$), $r=0.96$

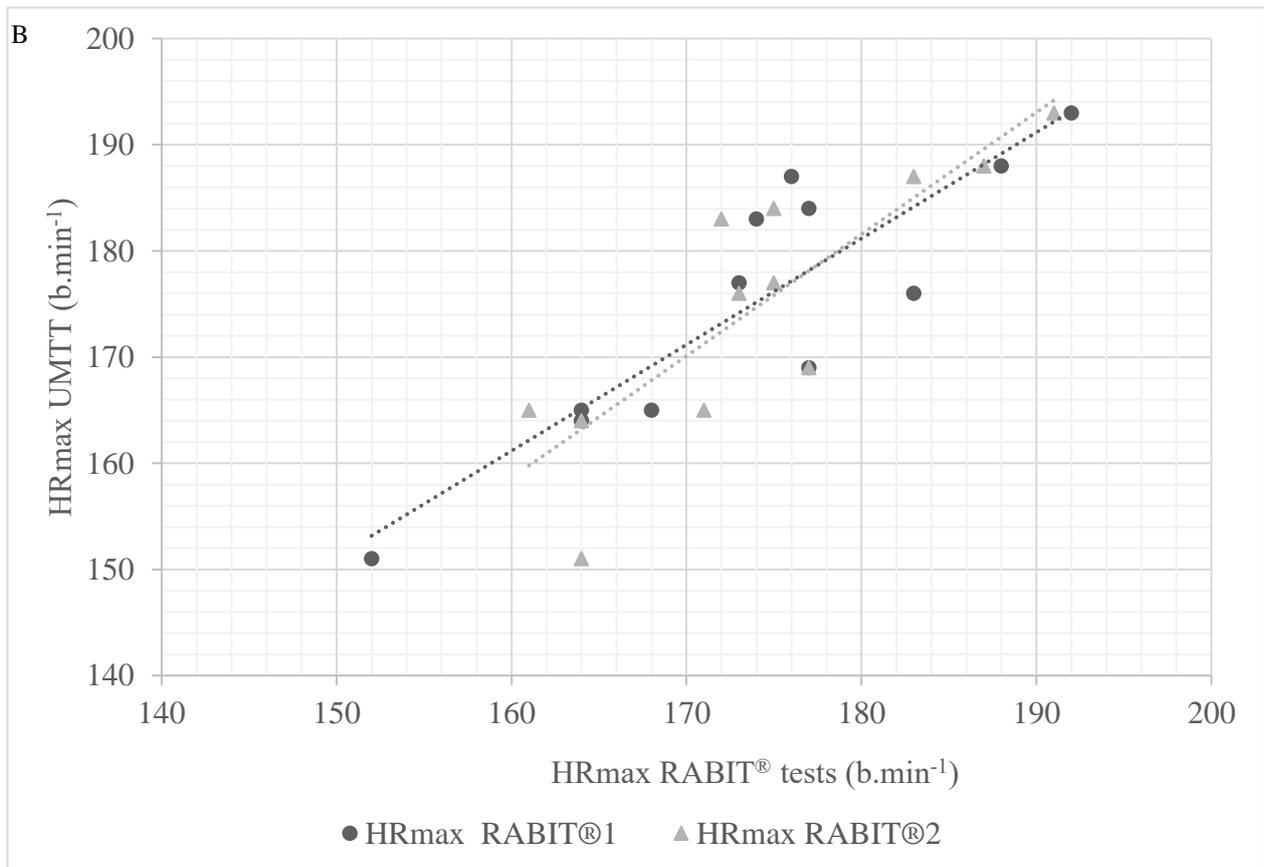
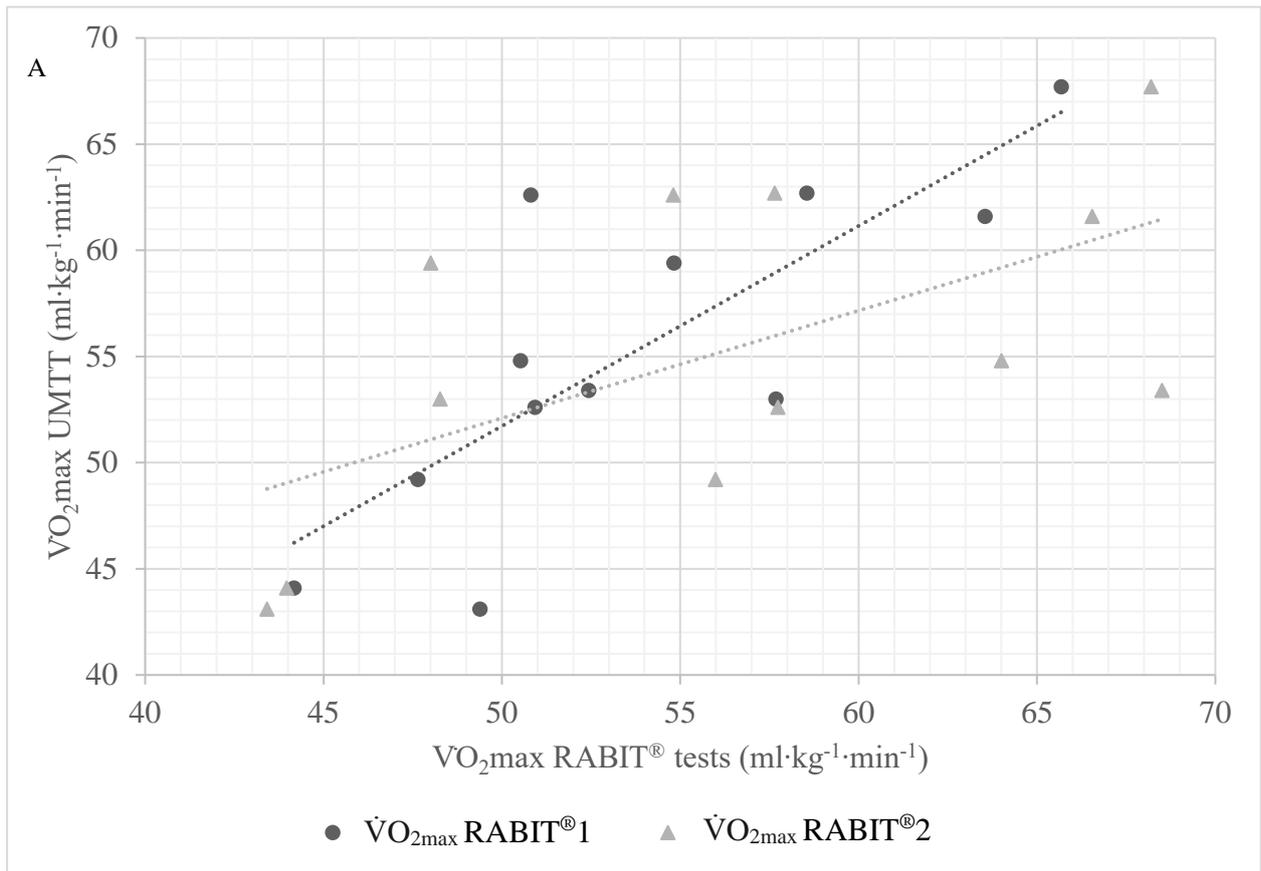
($p < 0.001$)/ $r=0.63$ ($p=0.028$), $r=0.88$ ($p < 0.001$)/ $r=0.87$ ($p < 0.001$) and $r=0.83$ ($p < 0.001$)/ $r=0.90$ ($p < 0.001$) (Figure 1).

TABLE 1 : Physiological, perceptual and physical responses recorded following completion of the UMTT and RABIT[®] tests.

	UMTT	RABIT [®] 1	RABIT [®] 2	p
$\dot{V}O_{2max}$ (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	55.4 ± 7.6	53.9 ± 6.4	56.4 ± 9.1	0.722
$\dot{V}E_{max}$ (L·min ⁻¹)	126.3 ± 27.5	124.1 ± 40.5	117.4 ± 27.9	0.798
HR _{max} (beats·min ⁻¹)	175.2 ± 12.5	174 ± 11.1	174.4 ± 9.2	0.966
Maximal RER	1 ± 0.09	0.99 ± 0.12	0.98 ± 0.10	0.963
Peak speed (km·h ⁻¹)	15.3 ± 1.9	16.7 ± 2.1*	16.7 ± 1.6*	0.002
Average speed (km·h ⁻¹)	12.1 ± 1.1	12.3 ± 1.7	12.3 ± 1.5	0.597

Abbreviations: UMTT, University of Montreal Track Test; RABIT[®], field-based, self-paced maximal oxygen consumption test; $\dot{V}O_{2max}$, maximal oxygen consumption; $\dot{V}E_{max}$, maximal ventilation; HR_{max}, maximal heart rate; RER, respiratory exchange ratio. Note: * indicates a significant difference ($p < 0.05$) between UMTT and RABIT[®]. The data are quoted as the mean ± SD.

In contrast, the $\dot{V}O_2$ in the verification phase for the two RABITs[®] was significantly lower than the $\dot{V}O_{2max}$ for the two RABITs[®] (51.5 ± 8.3 vs. 55.1 ± 7.8 ml·kg⁻¹·min⁻¹, respectively; $p < 0.001$). The speed in the verification phase was significantly greater (~115%) than the peak speed during the RPE17 stage (19.5 ± 2.6 vs. 16.7 ± 1.8 , respectively; $p < 0.001$). The HR_{max} in the verification phase did not differ significantly from the corresponding values measured at RPE17 in the two RABITs[®] (173.5 ± 10.3 vs. 174.2 ± 9.9 , respectively; $p=0.821$).



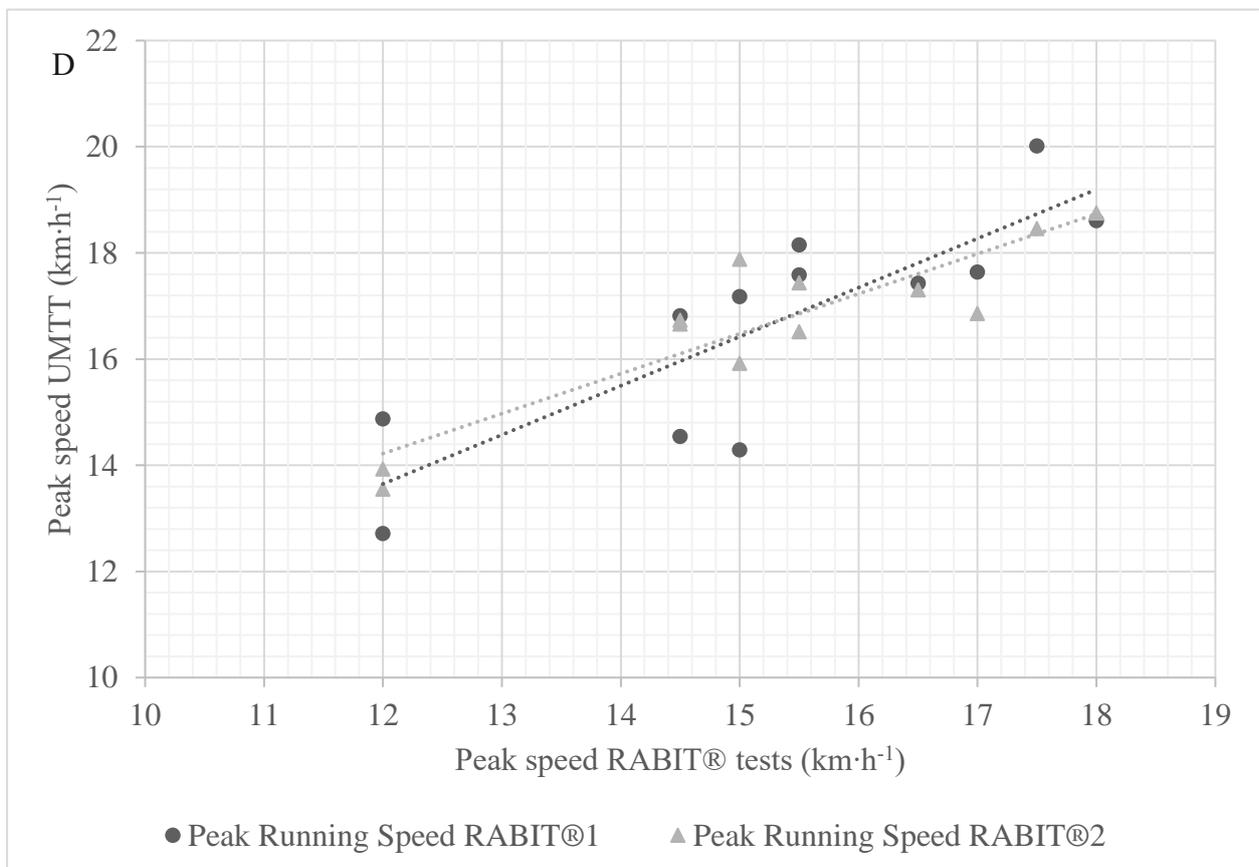
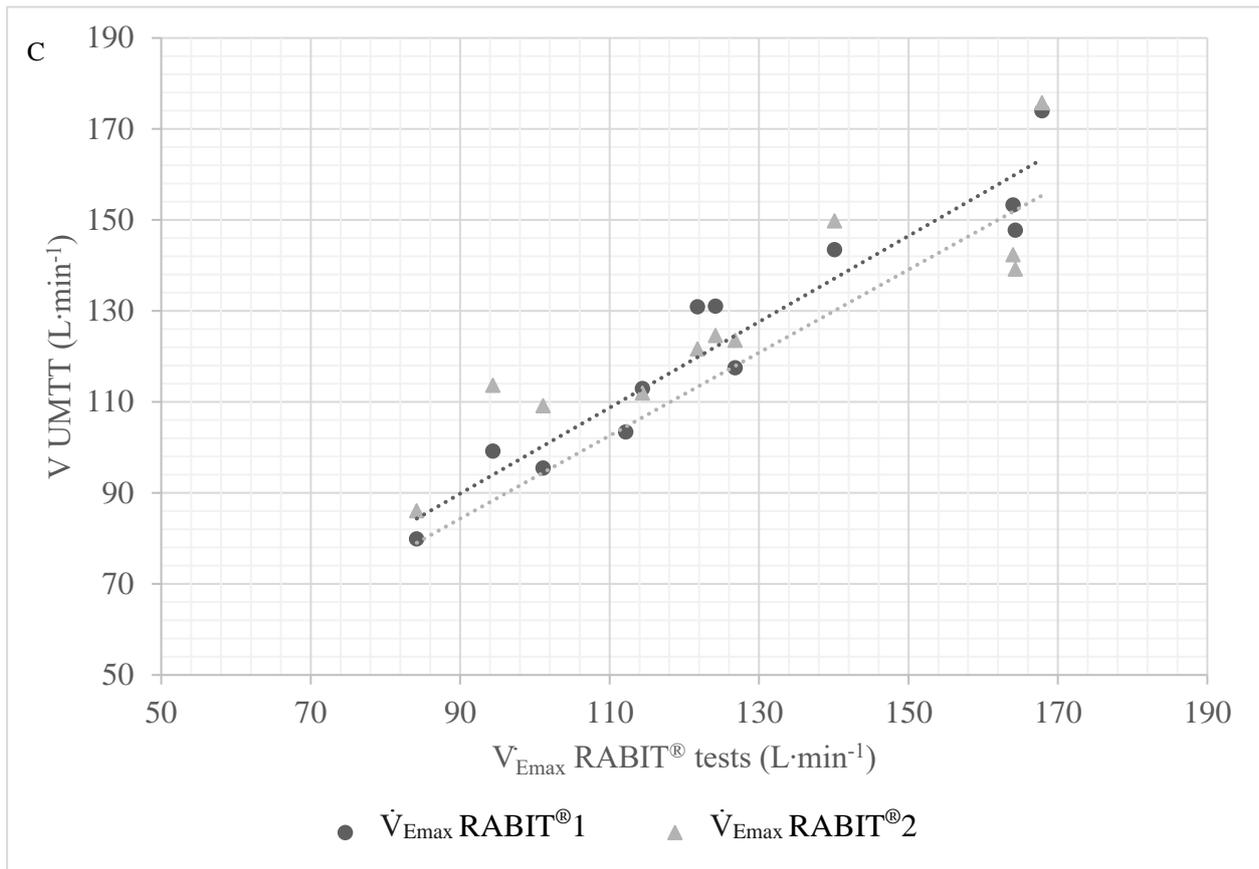


Figure 1 : A- Correlation between the University of Montreal Track Test (UMTT) and the RABIT® field-based, self-paced maximal oxygen consumption test with regard to (A) maximal oxygen consumption ($\dot{V}O_{2max}$), (B) maximal heart rate (HRmax), (C) maximal ventilation ($\dot{V}Emax$), and (D) peak running speed.

The RABIT[®] test is reproducible for cardiorespiratory and pacing responses according to the intensity of exertion (Table 2).

To assess the pacing response during the RABIT[®] tests, an analysis of the breath-by-breath data ($\dot{V}O_2$, $\dot{V}E$, RER), HR and running speed (maximal, mean, and end running speed) data showed that there were no significant differences between RABIT[®]1 and RABIT[®]2 at any of the three RPE stages (11, 14 and 17) (Table 2). In contrast, there were significant differences between each RPE (Table 2) in each RABIT[®] test (except for RPE 14 vs. 17 in RABIT[®]2 for the mean RER ($p=0.068$)). Each of the perceptual intensities corresponded to 59% (RPE 11), 73% (RPE 14) and 89% (RPE 17) of the peak speed, and 66-68% (RPE 11), 83-85% (RPE 14), and 92% (RPE 17) of the $\dot{V}O_{2max}$ observed from RABIT[®] tests.

TABLE 2 : Reproducibility of the physiological responses and speed responses in the RABIT[®] tests.

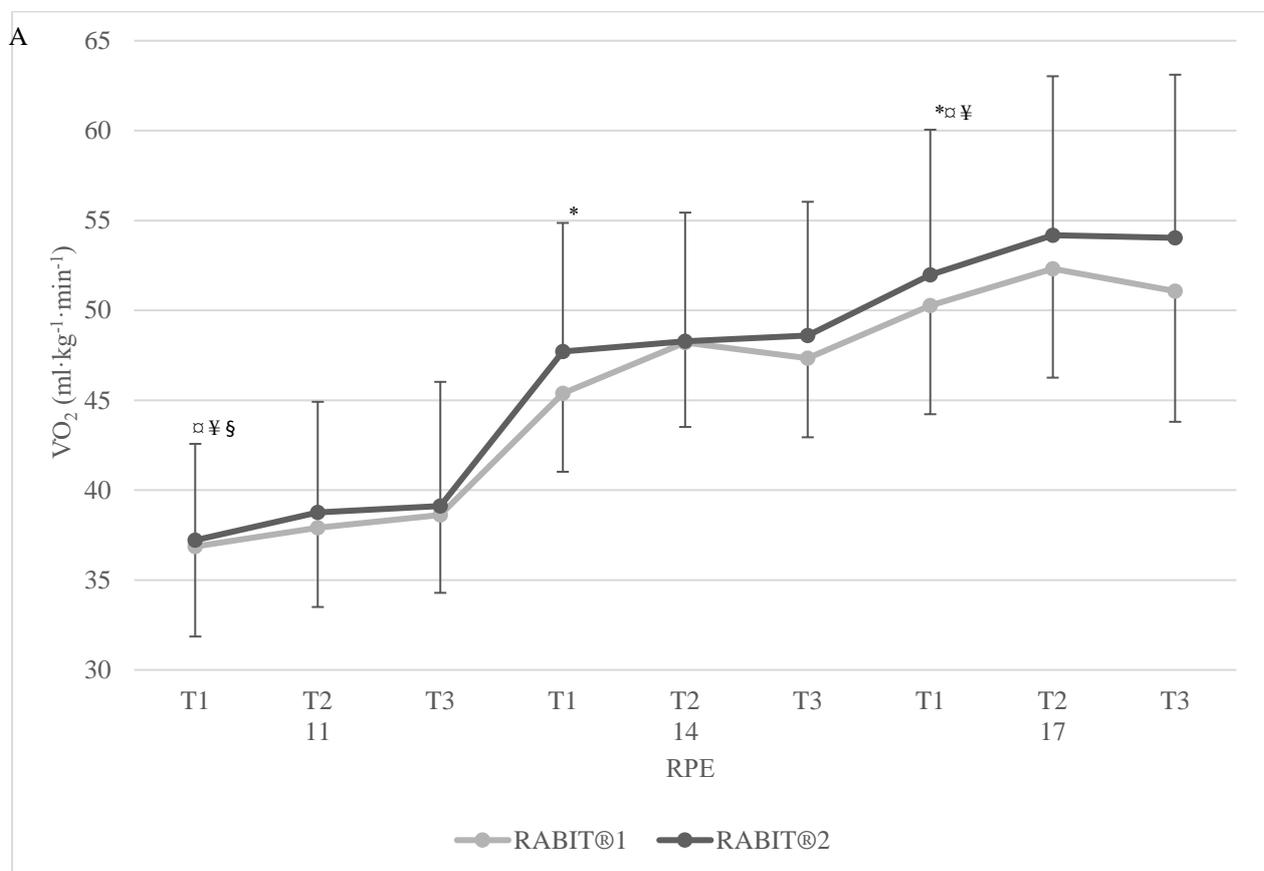
RABIT [®] test	RABIT [®] 1			RABIT [®] 2		
	RPE 11	RPE 14	RPE 17	RPE 11	RPE 14	RPE 17
$\dot{V}O_2$ (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	36.6 ± 3.9* §	45.7 ± 4.4 ¹	49.9 ± 6.0	37.3 ± 5.5* §	46.6 ± 7.0 ¹	51.9 ± 8.0
$\dot{V}E$ (L·min ⁻¹)	64.8 ± 12.1* §	94.1 ± 21.6 ¹	119.2 ± 27.2	63.1 ± 9.5* §	93.1 ± 12.9 ¹	118.0 ± 21.3
HR (b·min ⁻¹)	132.3 ± 13.0* §	156.5 ± 12.8 ¹	167.8 ± 11.0	131.4 ± 11.7* §	154.5 ± 14.6 ¹	167.1 ± 12.2
RER	0.9 ± 0.1* §	0.9 ± 0.1 ¹	1.0 ± 0.1	0.8 ± 0.1* §	0.9 ± 0.1	1.0 ± 0.1
Peak speed (km.h ⁻¹)	11.0 ± 1.3* §	13.7 ± 1.8 ¹	16.7 ± 2.1	10.7 ± 1.5* §	13.6 ± 2.0 ¹	16.6 ± 1.7
Average speed (km.h ⁻¹)	9.8 ± 1.2* §	12.3 ± 1.8 ¹	14.8 ± 2.3	9.8 ± 1.7* §	12.3 ± 1.5 ¹	14.9 ± 1.7
End speed (km.h ⁻¹)	9.4 ± 1.3* §	12.1 ± 1.6 ¹	14.5 ± 2.1	9.5 ± 1.8* §	11.9 ± 2.0 ¹	14.4 ± 1.8

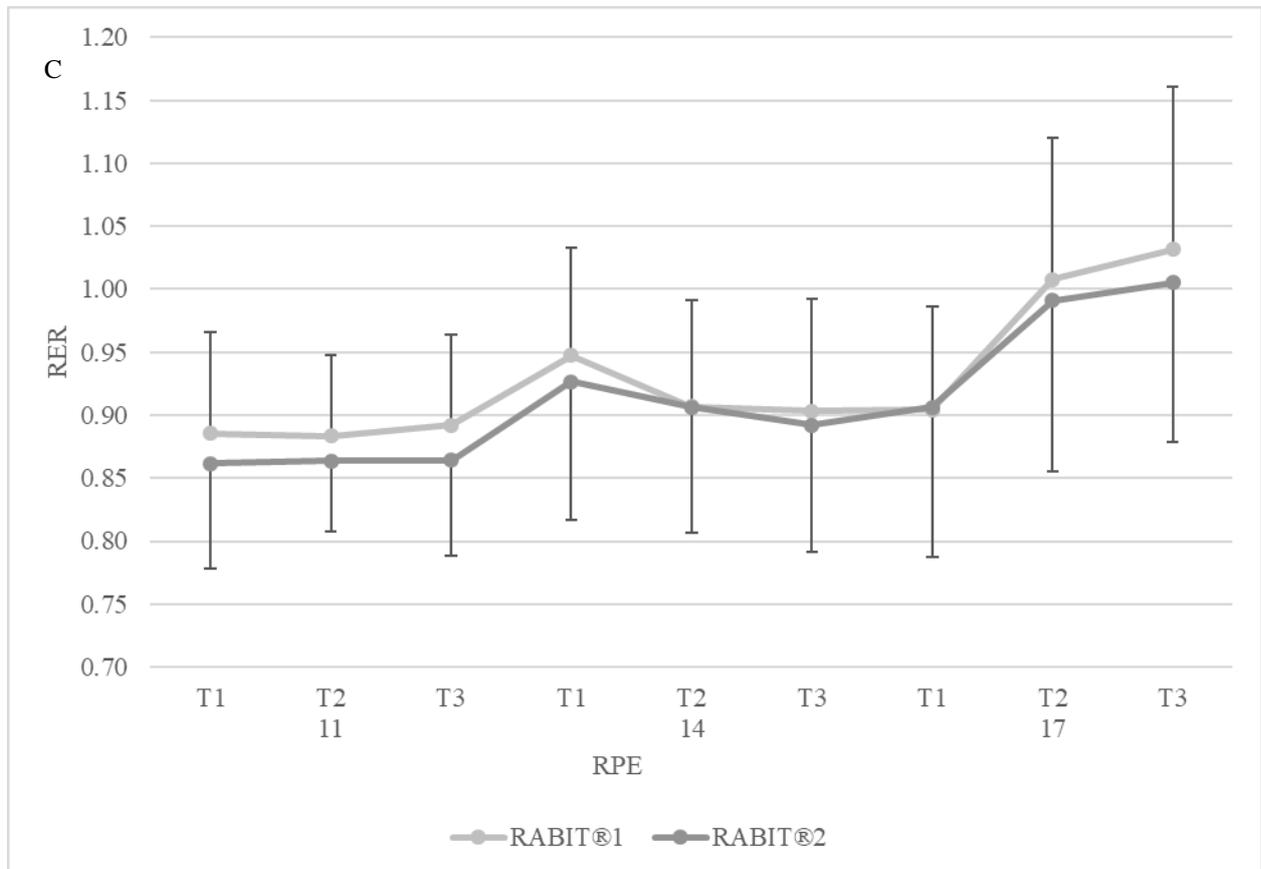
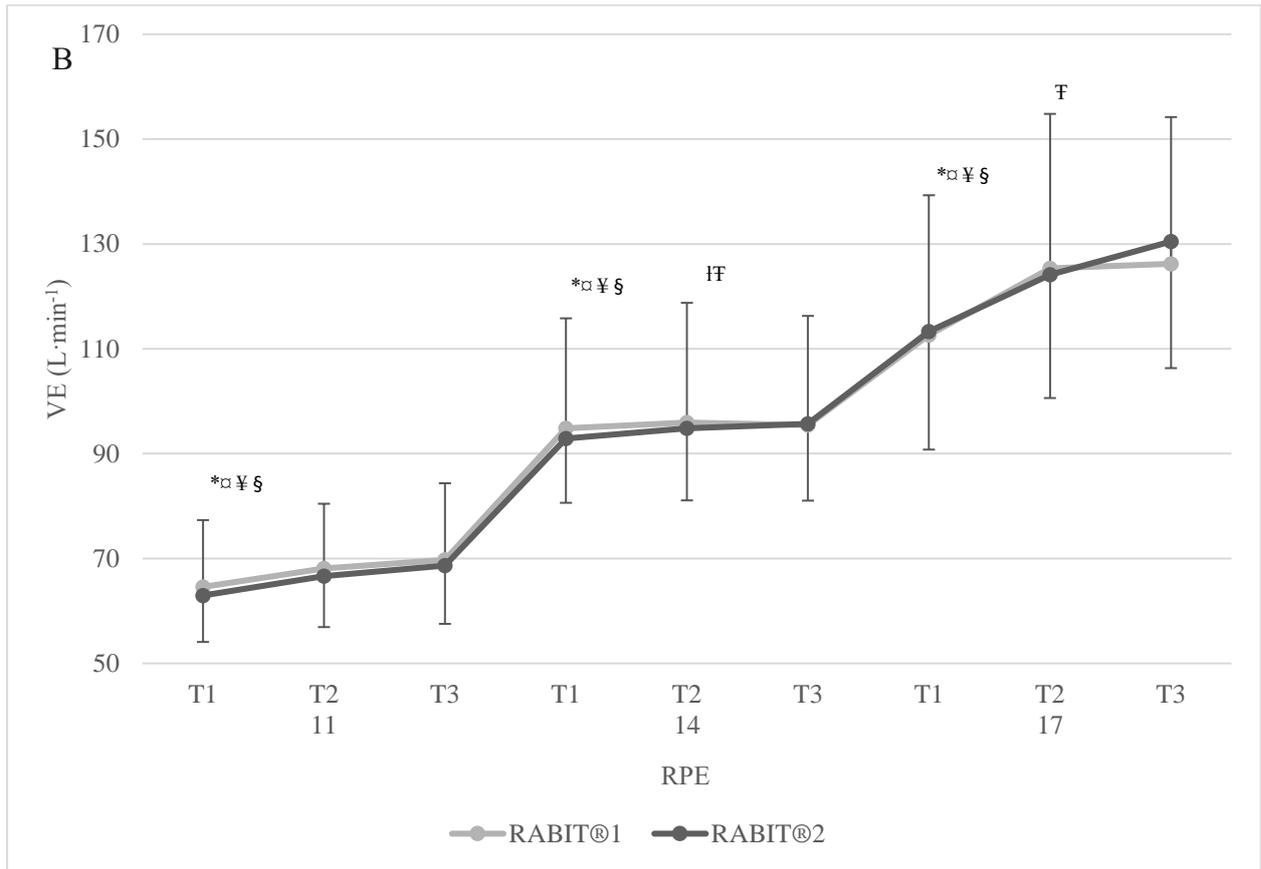
Abbreviations: RABIT[®], self-paced maximal oxygen consumption field-test; $\dot{V}O_2$, oxygen consumption; $\dot{V}E$, ventilation; HR, heart rate; RER, respiratory exchange ratio.

Note: * indicates a significant difference ($p<0.05$) between RPE 11 and RPE 14, § indicates a significant difference ($p<0.05$) between RPE 11 and RPE 17, and ¹ indicates a significant difference ($p<0.05$) between RPE 14 and RPE 17. The data are quoted as the mean ± SD.

The RABIT[®] test is reproducible for cardiorespiratory and pacing responses according to the duration of exertion (Figures 2 and 3).

In the submaximal stages (*i.e.* RPE11 and 14), the participants maintained their speed in a steady-state manner between T1 and T3 while increasing their cardiorespiratory responses ($p=0.099$ and $p=0.799$) (Figures 2 and 3). The RABIT[®] test was robust for measuring cardiorespiratory responses as a function of the intensity and duration of exercise (Figure 2).





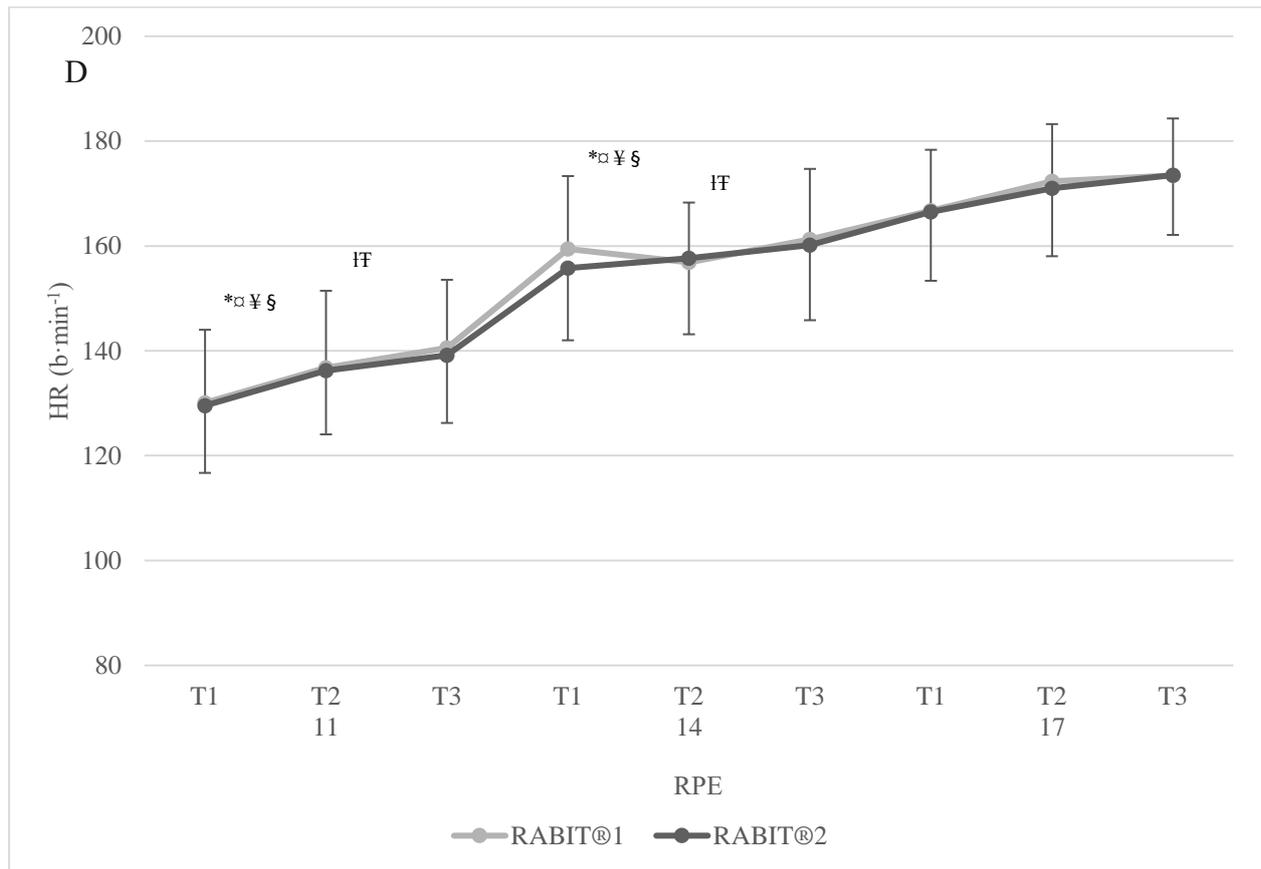


Figure 2 : A- Comparison of (A) oxygen consumption ($\dot{V}O_2$), (B) ventilation ($\dot{V}E$), (C) respiratory exchange ratio (RER), and (D) heart rate (HR) in two self-paced maximal oxygen consumption field-test (RABIT[®])1 and RABIT[®]2 for normalized durations (T1, T2 and T3) during the three RPE stages (RPE 11, 14, and 17).

Note: * indicates a significant difference ($p < 0.05$) between T1 and T2 in RABIT[®]1, § indicates a significant difference ($p < 0.05$) between T1 and T3 in RABIT[®]1, and † indicates a significant difference ($p < 0.05$) between T2 and T3 in RABIT[®]1. ‡ indicates a significant difference ($p < 0.05$) between T1 and T2 in RABIT[®]2, ¶ indicates a significant difference ($p < 0.05$) between T1 and T3 in RABIT[®]2, and †† indicates a significant difference ($p < 0.05$) between T2 and T3 in RABIT[®]2.

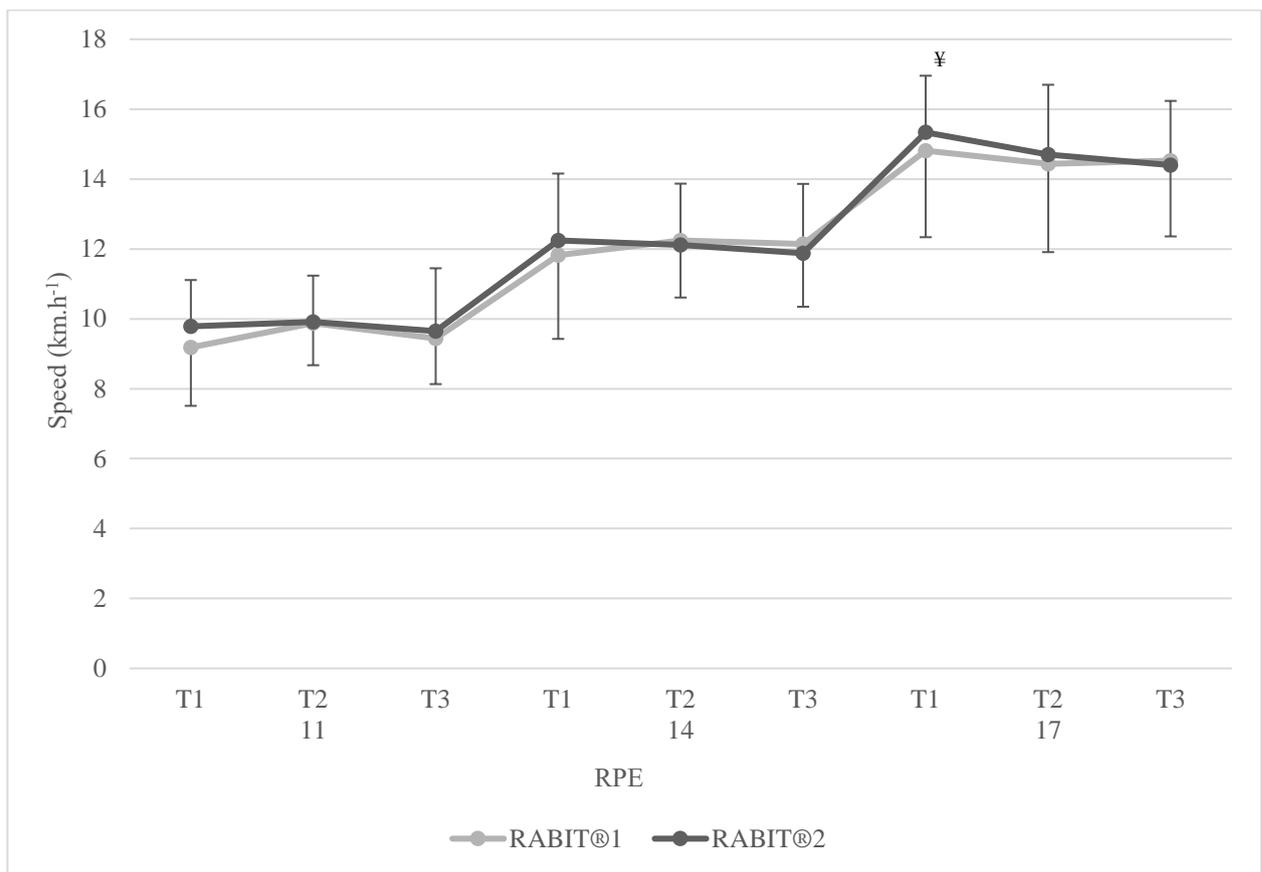


Figure 3 : Comparison of speed data in two field-based, self-paced maximal oxygen consumption tests (RABIT[®]1 and RABIT[®]2) for normalized durations (T1, T2 and T3) during the three RPE stages (RPE 11, 14, and 17).

Note: † indicates a significant difference ($p < 0.05$) between T1 and T3 in RABIT2.

DISCUSSION

The primary objective of the present study was to assess the validity and reproducibility of a new SPV field test (namely the RABIT[®] test) in recreational runners.

At first, we got the same maximal values in RABIT as in the UMTT - the track and field gold standard for determining $\dot{V}O_{2max}$ in runners³We obtain in the 3-minute RPE 17 of the RABIT protocol. This finding reinforces the pioneer work by Åstrand and Saltin (1961)¹⁸ who recommended measuring $\dot{V}O_{2max}$ during an all-out protocol of between 3 and 8 minutes. In the same way, Hanson *et al.* (2016)¹⁹ showed that a treadmill SPV test was as effective as the Bruce protocol proceeding with 3 minutes stages duration, in eliciting an accurate $\dot{V}O_{2max}$ easy applied

on track and field. These findings suggest that the $\dot{V}O_{2\max}$ boundaries do not change – even when the test is self-paced and perceptually regulated.

We can point out that even if the RABIT[®] did not require the participants to perceptually regulate their effort at RPE 20 (as required by many studies in the literature - especially Mauger et al., 2013²⁰), we found the same maximal $\dot{V}O_2$ value in the RABIT[®] as in the UMTT. Furthermore, the speed associated with $\dot{V}O_{2\max}$ was lower in the RABIT[®]; even though the subjects started at a higher peak speed than in the UMTT, they rapidly slowed during the RPE 17 stage while maintaining their $\dot{V}O_{2\max}$ (as previously observed in studies with a decremental test^{21,22}). Even though the requested RPE was 17, the subjects achieved $\dot{V}O_{2\max}$ as judged by the values in the UMTT and in the verification phase, where the difference in $\dot{V}O_2$ vs. the RABIT[®] was below the recommended 2%¹⁴. Moreover, according to the literature^{13,23,24}, the HR_{max} during the verification phase did not differ by more than 2% with regard to the value in the RABIT[®], and the workload was well above 105% (115%, in fact) of the peak speed in the RABIT[®]. In the study by Mauger and Sculthorpe¹⁷, the higher $\dot{V}O_{2\max}$ values achieved in the SPV test were attributed to a significant increase in power output in the final stage, followed by a significant drop at the end of the test. We also noted this phenomenon in the present study (see Figures 2 and 3). If we go deeper in the running strategy, we saw that all the runners adopted a fast-start strategy tending to achieve a supramaximal spike followed by a decline during the third part of the stage. Indeed, the workload corresponded to the value observed during the verification tests^{25,26} was equivalent to about 110% of the maximum power in the UMTT.

Yet, it has been shown that a fast-start/all-out strategy to high-intensity exercise accelerates the change in O_2 levels and improves exercise performance^{27,28} even if they decrease their speed after 1 minute, the $\dot{V}O_2$ was maintained at $\dot{V}O_{2\max}$ ²⁹. By consequence, even if we asked the runner to be at the intensity RPE 17, it seems that they have focused on the goal of running at a "hard" intensity for 3 minutes with a fast start strategy, the peak $\dot{V}O_2$ value would have been reached in the first minute of the last stage³⁰. Moreover, the HR followed the same time course as $\dot{V}O_2$ because

HR_{max} was reached. The results of the verification phase confirmed that the subjects had reached their maximal HR and $\dot{V}O_2$ in this 3 min stage. This leads us to conclude that even when a “submaximal” (RPE 17) effort was requested in the RABIT[®] test, the subject’s habit of choosing their own pace during track or road running prompted them to choose a fast-start strategy – resulting in their achievement of $\dot{V}O_{2max}$ at the RPE 17 stage. Similarly, Aisbett et al.,³¹ found that a fast-start pacing strategy was associated with an elevated average $\dot{V}O_2$, when compared with even- or slow-starting conditions.

Secondly, our results show that, a familiarisation phase did not appear to be required for the RPE-based RABIT[®] test given that the runners got the same physiological responses. Indeed, all the participants had the same maximal $\dot{V}O_2$, HR, \dot{V}_E and RER values in the 3-minute RABIT[®] 17 RPE session. Indeed, after considering maximal values, we established that the RABIT[®] test allowed our runners to produce reproducible submaximal cardiorespiratory and running speed responses as a function of the intensity and relative exercise duration by scaling the data to the first, second and last thirds of the test duration^{32,33}. To the best of our knowledge, only one literature study has reported that mean submaximal cardiorespiratory and running speed responses are reproducible in an SPV test¹⁰. However, the latter study’s four stages (RPE 11, 13, 15 and 17) all had the same duration (2 minutes); this aspect of the study’s design prevents a clear demonstration of reproducibility because effort duration is known to have an effect on physiological responses and the RPE. Importantly, our SPV field test took account of the variability in the RPE values for participants performing the same constant relative workload³⁴. Furthermore, Garcin and Billat (2001)³⁵ showed that the RPE and the estimation of time limit (ETL) increased linearly with time to exhaustion for exercise intensities at between 90 and 100% of $\dot{V}O_{2max}$. Furthermore, at a given relative time (% of the time limit (tlim)), athletes perceived exercise as “hard” and felt that they could endure less exercise at $v\dot{V}O_{2max}$ than at $v\Delta 50$ (an intermediate speed between the lactate threshold and $\dot{V}O_{2max}$). When participants began to perceive exercise as “hard” (*i.e.* RPE 15), they had run for 36.4% of tlim at $v\dot{V}O_{2max}$ and 46% of tlim at

$v\Delta 50$. These results indicated that the RPE and the ETL reflect a mixture of exercise intensity and exercise duration (i) during all-out runs at 90 and 100% of $v\dot{V}O_{2max}$ and even (ii) when $\dot{V}O_{2max}$ is reached at the end of a run at $v\Delta 50$. Thus, one strength of the RABIT[®] test is its reproducibility for assessing cardiorespiratory and pacing responses as a function of both the intensity and duration of exercise.

Garcin and Billat had already shown that a human athlete is able to estimate the time he/she is able to sustain for a given constant speed from 90 to 100% of $v\dot{V}O_{2max}$ ³⁵. In addition, the present study shows for the first time that for a given RPE and without a learning step, the runner is able to reproduce both speed and oxygen consumption at the same point in the step protocol (Figures 2 and 3 of the present article). This suggests that RPE 17 was probably a supercritical intensity that enabled the $\dot{V}O_2$'s slow component to appear even during our 3-minute stage. This demonstration was repeated much later by Burnley et al³⁶. Considering Table 1 (page 271) in Lim et al. (2016) publication¹⁰, it can be seen that the subjects displayed the same $\dot{V}O_2$ peak at a lower maximum speed in SPV2 vs SPV1 and SPV3. Figure 1 in the same publication (page 272) shows that speed strongly decreased during the RPE 20 stage - in contrast to the RPE17 stage. As a consequence, the final speed in a 2 min RPE 20 stage - it is difficult to hold maximum speed for 2 min, such as in an 800 m race - was almost the same as at RPE 17 (i.e. about 14 km.h⁻¹, after a peak at 17 km.h⁻¹).

That is why the duration of each stage in our RABIT[®] protocol differs (10 min at RPE 11, 5 min at RPE 14, and 3 min at RPE 17), so as to take account of effect of time on the $\dot{V}O_2$, the physiological response, and the estimated time limit that all the runners have in mind. The RPE might be a subjective estimation of (i) the duration of exercise (rather than the intensity) at a moderate exercise intensity, and (ii) both duration and intensity at maximal exercise intensities³⁵. However, these studies were performed at a constant speed. Thus, it is still not known whether humans can reproduce the same physiological and running speed responses at three different RPEs (from moderate intensity to high intensity)³⁷. Eston and Williams³⁸ reported that the stated RPE

after 4 minutes of cycling exercise at an RPE of 9, 13 and 17 was a reliable means of regulating of exercise intensity; however, the researchers focused on the difference between the field and the laboratory results, rather than the reproducibility of the cardiorespiratory response⁹. Furthermore, Bertuzzi *et al.*, 2006³² have shown that the relationships between perceived exertion, heart rate and running velocity during a simulated 10 km race did not depend on the exercise duration³². In fact, the RPE is inversely and directly proportional to the remaining exercise duration^{33,39-41}. Faulkner *et al.* (2008)³³ showed that whatever the distance, course elevation (gradient), and variations in pacing strategy, there were no differences in HR_{max} when the latter was expressed against the percent time or the percent distance^{42,43}.

Teleoanticipation is another aspect to consider; it has been suggested that runners tend to adopt the same overall pacing strategy, even though several different strategies are available for events of different distances and durations. Hence, the most important factor in choosing a pacing strategy is knowledge of the endpoint of a particular event⁴⁴. In line with this teleoanticipation hypothesis, the ETL corresponds to the perception of time when exercise at a constant power and a constant speed is performed until exhaustion⁴³. However, the human self-paces his/her effort in real life, and notably in races from the 1500 m middle-distance event upwards; we have used differential modelling of anaerobic and aerobic metabolism to show that runners continuously adjust their speed as a function of the remaining anaerobic capacity reserve⁴⁵. The latter finding demonstrated that runners are able to adjust their effort by varying their running speed according to perceived effort. We recently found that recreational runners were able to adjust their acceleration every 4 seconds by asking them to do “soft”, “medium” or “hard” accelerations⁴⁶. In the present study, the runners maintained their speed in a steady-state manner during the submaximal stages (RPE 11 and 14), while increasing the intensity of their cardiorespiratory responses as the run continues. In contrast, our recreational runners maintained their $\dot{V}O_{2max}$ during the maximal stage (RPE 17) by dropping their running speed. Thus, one can hypothesize that a

runner uses the variation in speed (*i.e.* acceleration) as a marker to preserve the power of running-specific muscles - even when the cardiorespiratory variables are rising⁴⁶.

However, we still do not know how the runner associates a given RPE with a speed vs. time. In perspective of the practical applications, the both major points show, for the first time, that recreational runners are able to self-pace in a reproducible way non only, as a function of the intensity, but also as a fonction of the relative exercise duration, their running speed and cardiorespiratory responses.

PRACTICAL APPLICATIONS

Most runners train by monitoring their heart rate and running speed, rather than the perceived effort. The runners or their coaches then define training zones with regard to $\dot{V}O_{2\max}$ or HRmax. The verbal communication used in the RABIT might constitute a novel tool for defining the different training zones and thus producing a training plan suited to the runner's ongoing physical condition. Moreover, the three intensities of the RABIT® stages constitute practical markers that coaches can easily use to categorise their athletes' profiles.

In contrast to the present study, a runner performing the RABIT® test alone will probably monitor his/her heart rate (using a monitor) and running speed (using a GPS device). He/she will probably check the correspondence between the perceived intensity and that measured intensity objectively.

To better understand the mechanisms of self-paced control in an ecological setting (such as track tests and trail races), there is a need to perform additional studies in which speed, cardiorespiratory responses and RPE responses are controlled in turn.

CONCLUSIONS

Our present results showed that also recreational runners were able to reproducibly adjust their effort as a function of the RPE (11, 14 and 17) and the duration of the RABIT[®] test stages (10, 5 and 3 minutes). The running speed and cardiorespiratory responses were reproducible with regard to the RPE and to the proportion of each test stage (*i.e.* 30%, 60% and 90% of the stage's total duration). Thus, our results showed that the RABIT[®] test is a reproducible, easy-to-use, field-based SPV test for recreational runners interested in defining their training zones without the need for expensive $\dot{V}O_2$ monitoring equipment.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to thank the study participants for their collaboration, and Jean Pierre Koralsztein and Damien Vitiello for advice on drafting the manuscript. None of the authors have conflicts of interest associated with the present work. Claire Molinari received a CIFRE PhD fellowship, funded by BillaTraining. The work did not receive any significant funding that could have influenced its outcome.

REFERENCES

1. Foster C, Rodriguez-Marroyo JA, de Koning JJ. Monitoring Training Loads: The Past, the Present, and the Future. *Int J Sports Physiol Perform.* 2017;12(Suppl 2):S2-2. doi:10.1123/IJSP.2016-0388
2. Academy USS. On Ditching the Watch while Training: Re-examining the Pace-based Approach to Training Long-distance Runners. *Sport J.* June 2016.

<http://thesportjournal.org/article/on-ditching-the-watch-while-training-re-examining-the-pace-based-approach-to-training-long-distance-runners/>. Accessed July 10, 2019.

3. Léger L, Boucher R. An indirect continuous running multistage field test: the Université de Montréal track test. *Can J Appl Sport Sci J Can Sci Appl Au Sport*. 1980;5(2):77-84.
4. Seiler S, Sjursen JE. Effect of work duration on physiological and rating scale of perceived exertion responses during self-paced interval training. *Scand J Med Sci Sports*. 2004;14(5):318-325. doi:10.1046/j.1600-0838.2003.00353.x
5. Eston R, Williams JG, Faulkner J. Control of exercise intensity using heart rate, perceived exertion and other non-invasive procedures. In: New York Routledge; 2009. <https://trove.nla.gov.au/version/241504671>.
6. Borg GAV. *Physical Performance and Perceived Exertion*. Oxford, England: Univer. Lund; 1962.
7. Evans H, Parfitt G, Eston R. Use of a perceptually-regulated test to measure maximal oxygen uptake is valid and feels better. *Eur J Sport Sci*. 2014;14(5):452-458. doi:10.1080/17461391.2013.832804
8. ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription - American College of Sports Medicine - Google Livres. Accessed April 17, 2019.
9. Ceci R, Hassmén P. Self-monitored exercise at three different RPE intensities in treadmill vs field running. *Med Sci Sports Exerc*. 1991;23(6):732-738.
10. Lim W, Lambrick D, Mauger AR, Woolley B, Faulkner J. The effect of trial familiarisation on the validity and reproducibility of a field-based self-paced VO2max test. *Biol Sport*. 2016;33(3):269-275. doi:10.5604/20831862.1208478
11. Medicine AC of S. ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription. Lippincott Williams & Wilkins; 2013.
12. Hawkins MN, Raven PB, Snell PG, Stray-Gundersen J, Levine BD. Maximal oxygen uptake as a parametric measure of cardiorespiratory capacity. *Med Sci Sports Exerc*. 2007;39(1):103-107. doi:10.1249/01.mss.0000241641.75101.64

13. Midgley AW, Carroll S, Marchant D, McNaughton LR, Sieglar J. Evaluation of true maximal oxygen uptake based on a novel set of standardized criteria. *Appl Physiol Nutr Metab.* 2009;34(2):115-123. doi:10.1139/H08-146
14. Midgley AW, McNaughton LR, Carroll S. Verification phase as a useful tool in the determination of the maximal oxygen uptake of distance runners. *Appl Physiol Nutr Metab.* 2006;31(5):541-548. doi:10.1139/h06-023
15. Midgley AW, McNaughton LR, Polman R, Marchant D. Criteria for determination of maximal oxygen uptake: a brief critique and recommendations for future research. *Sports Med Auckl NZ.* 2007;37(12):1019-1028.
16. Bland JM, Altman DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet Lond Engl.* 1986;1(8476):307-310.
17. Mauger AR, Sculthorpe N. A new VO₂max protocol allowing self-pacing in maximal incremental exercise. *Br J Sports Med.* 2012;46(1):59-63. doi:10.1136/bjsports-2011-090006
18. Åstrand P-O, Saltin B. Oxygen uptake during the first minutes of heavy muscular exercise. *J Appl Physiol.* 1961;16(6):971-976. doi:10.1152/jappl.1961.16.6.971
19. Hanson NJ, Scheadler CM, Lee TL, Neuenfeldt NC, Michael TJ, Miller MG. Modality determines VO₂max achieved in self-paced exercise tests: validation with the Bruce protocol. *Eur J Appl Physiol.* 2016;116(7):1313-1319. doi:10.1007/s00421-016-3384-0
20. Mauger AR, Metcalfe AJ, Taylor L, Castle PC. The efficacy of the self-paced $\dot{V}O_{2\max}$ test to measure maximal oxygen uptake in treadmill running. *Appl Physiol Nutr Metab.* 2013;38(12):1211-1216. doi:10.1139/apnm-2012-0384
21. Billat VL, Petot H, Landrain M, Meilland R, Koralsztein JP, Mille-Hamard L. Cardiac output and performance during a marathon race in middle-aged recreational runners. *ScientificWorldJournal.* 2012;2012:810859. doi:10.1100/2012/810859
22. Petot H, Meilland R, Le Moyec L, Mille-Hamard L, Billat VL. A new incremental test for VO₂max accurate measurement by increasing VO₂max plateau duration, allowing the

investigation of its limiting factors. *Eur J Appl Physiol.* 2012;112(6):2267-2276.
doi:10.1007/s00421-011-2196-5

23. Stachenfeld NS, Eskenazi M, Gleim GW, Coplan NL, Nicholas JA. Predictive accuracy of criteria used to assess maximal oxygen consumption. *Am Heart J.* 1992;123(4 Pt 1):922-925.
doi:10.1016/0002-8703(92)90697-t

24. Scharhag-Rosenberger F, Carlsohn A, Cassel M, Mayer F, Scharhag J. How to test maximal oxygen uptake: a study on timing and testing procedure of a supramaximal verification test. *Appl Physiol Nutr Metab Physiol Appl Nutr Metab.* 2011;36(1):153-160. doi:10.1139/H10-099

25. Straub AM, Midgley AW, Zavorsky GS, Hillman AR. Ramp-incremented and RPE-clamped test protocols elicit similar VO₂max values in trained cyclists. *Eur J Appl Physiol.* 2014;114(8):1581-1590. doi:10.1007/s00421-014-2891-0

26. Colakoglu M, Ozkaya O, Balci GA, Yapicioglu B. Stroke volume responses may be related to the gap between peak and maximal O₂ consumption. *Isokinet Exerc Sci.* 2016;24(2):133-139. doi:10.3233/IES-160610

27. Bailey SJ, Vanhatalo A, DiMenna FJ, Wilkerson DP, Jones AM. Fast-start strategy improves VO₂ kinetics and high-intensity exercise performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2011;43(3):457-467. doi:10.1249/MSS.0b013e3181ef3dce

28. Foster C, Snyder AC, Thompson NN, Green MA, Foley M, Schrage M. Effect of pacing strategy on cycle time trial performance. *Med Sci Sports Exerc.* 1993;25(3):383-388.

29. Petot H, Meilland R, Le Moyec L, Mille-Hamard L, Billat VL. A new incremental test for VO₂max accurate measurement by increasing VO₂max plateau duration, allowing the

investigation of its limiting factors. *Eur J Appl Physiol.* 2012;112(6):2267-2276. doi:10.1007/s00421-011-2196-5

30. Jones AM, Vanhatalo A, Burnley M, Morton RH, Poole DC. Critical power: implications for determination of $\dot{V}O_{2\max}$ and exercise tolerance. *Med Sci Sports Exerc.* 2010;42(10):1876-1890. doi:10.1249/MSS.0b013e3181d9cf7f

31. Aisbett B, Le Rossignol P, McConell GK, Abbiss CR, Snow R. Effects of starting strategy on 5-min cycling time-trial performance. *J Sports Sci.* 2009;27(11):1201-1209. doi:10.1080/02640410903114372

32. Bertuzzi RC de M, Nakamura FY, Rossi LC, Kiss MAPD, Franchini E. Independência temporal das respostas do esforço percebido e da frequência cardíaca em relação à velocidade de corrida na simulação de uma prova de 10 km. *Rev Bras Med Esporte.* 2006;12(4):170-183.

33. Faulkner J, Parfitt G, Eston R. The rating of perceived exertion during competitive running scales with time. *Psychophysiology.* 2008;45(6):977-985. doi:10.1111/j.1469-8986.2008.00712.x

34. Garcin M, Danel M, Billat V. Perceptual responses in free vs. constant pace exercise. *Int J Sports Med.* 2008;29(6):453-459. doi:10.1055/s-2007-989237

35. Garcin M, Billat V. Perceived exertion scales attest to both intensity and exercise duration. *Percept Mot Skills.* 2001;93(3):661-671. doi:10.2466/pms.2001.93.3.661

36. Burnley M, Doust JH, Vanhatalo A. A 3-min all-out test to determine peak oxygen uptake and the maximal steady state. *Med Sci Sports Exerc.* 2006;38(11):1995-2003. doi:10.1249/01.mss.0000232024.06114.a6

37. Vanhatalo A, Poole DC, DiMenna FJ, Bailey SJ, Jones AM. Muscle fiber recruitment and the slow component of O_2 uptake: constant work rate vs. all-out sprint exercise. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 2011;300(3):R700-707. doi:10.1152/ajpregu.00761.2010

38. Eston RG, Williams JG. Reliability of ratings of perceived effort regulation of exercise intensity. *Br J Sports Med.* 1988;22(4):153-155.

39. Noakes TD. Linear relationship between the perception of effort and the duration of constant load exercise that remains. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. 2004;96(4):1571-1572; author reply 1572-1573. doi:10.1152/jappphysiol.01124.2003

40. Eston R, Faulkner J, Gibson ASC, Noakes T, Parfitt G. The effect of antecedent fatiguing activity on the relationship between perceived exertion and physiological activity during a constant load exercise task. *Psychophysiology*. 2007;44(5):779-786. doi:10.1111/j.1469-8986.2007.00558.x
41. Joseph T, Johnson B, Battista RA, et al. Perception of fatigue during simulated competition. *Med Sci Sports Exerc*. 2008;40(2):381-386. doi:10.1249/mss.0b013e31815a83f6
42. GARCIN M, VAUTIER J-F, VANDEWALLE H, WOLFF M, MONOD H. Ratings of perceived exertion (RPE) during cycling exercises at constant power output. *Ergonomics*. 1998;41(10):1500-1509. doi:10.1080/001401398186234
43. Coquart JBJ, Dufour Y, Gros Lambert A, Matran R, Garcin M. Relationships Between Psychological Factors, RPE and Time Limit Estimated by Teleoanticipation. *Sport Psychol*. 2012;26(3):359-374. doi:10.1123/tsp.26.3.359
44. St Clair Gibson A, Lambert EV, Rauch LHG, et al. The role of information processing between the brain and peripheral physiological systems in pacing and perception of effort. *Sports Med Auckl NZ*. 2006;36(8):705-722.
45. Billat V, Hamard L, Koralsztejn JP, Morton RH. Differential modeling of anaerobic and aerobic metabolism in the 800-m and 1,500-m run. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. 2009;107(2):478-487. doi:10.1152/jappphysiol.91296.2008
46. Billat V, Brunel NJ-B, Carbillet T, Labbé S, Samson A. Humans are able to self-paced constant running accelerations until exhaustion. *Phys Stat Mech Its Appl*. 2018;506:290-304. doi:10.1016/j.physa.2018.04.058

En conclusion de cette étude, nous considérons que les coureurs de loisirs savent gérer leur effort de manière à reproduire des réponses physiologiques dans un temps et une intensité donnée. De même, leur perception de la pénibilité de l'effort lors d'un effort maximal induit une stratégie de course identique pour arriver à leur fin, c'est-à-dire, que cela leur permet de solliciter au maximum leur capacité aérobie.

Nous pouvons donc supposer qu'il y ait une stabilité de *gouvernance* au titre de la sensation, qui intégrerait toutes ces notions, d'endurance, de puissance, et permettrait donc d'avoir $\dot{V}O_{2max}$ mais pas que. Pour autant, nous avons tout de même observé ce qu'il se passait au niveau de la variable physiologique $\dot{V}O_{2max}$, certes cette fois en partant du postulat qu'il y avait bien un *gouverneur central*, mais toujours lors d'un protocole et non sur une course réelle.

De ce fait, dans notre seconde étude, nous sommes partis d'une situation réelle dans laquelle le coureur est supposé avoir un *central gouverneur* optimum, ce qui signifierait que, les coureurs ont la solution (de gouvernance, de performance) en eux. Nous changeons ainsi de paradigme sans pour autant abandonner $\dot{V}O_{2max}$ puisque l'on intègre la notion d'énergie à $\dot{V}O_{2max}$. En d'autres termes, il est intéressant de comprendre lors de conditions réelles de performance, lorsque la distance est la variable de contrôle (variable indépendante imposée au coureur), si les coureurs sont capables "intuitivement" de mobiliser toute leur énergie à la puissance aérobie la plus élevée qu'est $\dot{V}O_{2max}$. $\dot{V}O_{2max}$ n'étant pas limitant en soi, l'énergie à cette variable le serait peut-être. En effet, le *central gouverneur* pourrait intégrer inconsciemment la quantité d'énergie à $\dot{V}O_{2max}$ qu'un coureur peut solliciter lors de son effort maximal.

Par conséquent, quel que soit la discipline (100m ou 10 km), l'énergie à $\dot{V}O_{2max}$ ferait partie du *central gouverneur*, qui lui définit la stratégie de course. Nous nous sommes donc intéressés à l'énergie à $\dot{V}O_{2max}$ dans une activité où le *central gouverneur* est le pilote avec comme seule indication la distance, soit une performance typique.

3.2 Énergie produite à $\dot{V}O_{2max}$ en sprint et sur longue distance.

3.2.1 Résumé

Il a été démontré que l'énergie produite à $\dot{V}O_{2max}$ ($E@ \dot{V}O_{2max}$) était obtenue dans une large gamme d'intensités d'exercices « supra-critiques » à puissance constante. Cette production d'énergie à la puissance aérobie la plus élevée pourrait donc être un continuum énergétique (pas de différences significatives) entre les courtes et longues distances en course à pied (du sprint au 10 km). De plus, $E@ \dot{V}O_{2max}$ pourrait prédire les performances en course de demi-fond (telle que la course de 3000 m) dans un groupe de coureurs avec des valeurs de $\dot{V}O_{2max}$ similaires. 66 athlètes (100 m au 10 km) portaient des analyseurs portables d'échange gazeux lors de compétitions réelles (courses de 800 m, 1500 m, 3000 m) ou de courses simulées (pour des distances de 100m, 200m et 10 km). $E@ \dot{V}O_{2max}$, exprimé en fraction de la contribution énergétique du système aérobie, ne diffère pas de manière significative entre le sprint et le 10 kilomètres ($36,8 \pm 26,2$ contre $38,2 \pm 34,0\%$, $p = 0,919$). $E@ \dot{V}O_{2max}$ (exprimé en pourcentage d'énergie aérobie ou totale) était corrélé aux performances pour la course de 3000 m seulement ($r = -0,86$, $p = 0,003$ pour la contribution d'énergie aérobie ; $r = -0,84$, $p = 0,005$ pour la production d'énergie totale). Ainsi nous constatons que la production d'énergie à $\dot{V}O_{2max}$ a largement contribué à la production totale d'énergie sur des courses de moyenne et même de courte distance, mais elle n'a permis de prédire la performance que sur 3 000 m. Des études supplémentaires seront nécessaires pour déterminer si cette production spécifique d'énergie à la puissance aérobie maximale est un élément de la théorie unifiée de l'entraînement, à savoir ; un entraînement ne séparant plus l'aérobie de l'anaérobie, (par exemple, les sprinteurs doivent s'entraîner à $\dot{V}O_{2max}$ et les fondeurs à une puissance maximale).

3.2.2 Article 2

Ce travail fait l'objet d'un article actuellement soumis au Journal applied of Physiology. Il a été soumis comme poster au 18ème congrès international de l'Association des Chercheurs en Activité Physique et Sportive.

1. Title: Relative aerobic energy production at $\dot{V}O_{2max}$ from sprinting through to long-distance running

2. Full names of the authors and institutional/corporate affiliation

V.L. Billat^{1,2} and C. Molinari³

1. Université d'Evry, Université Paris-Saclay, F-91025 Evry, France

2. I3SP, Université de Paris, Université Paris Descartes, F-75015 Paris, France.

3. UBIAE, Université d'Evry, Université Paris-Saclay, F-91025 Evry, France

3. Running head: Energy produced at $\dot{V}O_{2max}$ from 100 m to 10K

4. Contact details for the corresponding author: Véronique Billat, Université d'Evry, Université Paris-Saclay, F-91025 Evry, France, and I3SP Université de Paris, Université Paris Descartes, Paris, France. veroniquelouisebillat@gmail.com,

ABSTRACT

Energy production at $\dot{V}O_{2max}$ ($E@ \dot{V}O_{2max}$, i.e. at the highest aerobic power) is elicited at a wide range of constant-load “supercritical” exercise intensities. We hypothesized that $E@ \dot{V}O_{2max}$ is the common energy link between short- and long-distance running (from a 100 m sprint to a 10K run) and, when expressed as a proportion of total aerobic energy production, might not differ significantly between distances. Furthermore, we hypothesized that $E@ \dot{V}O_{2max}$ predicts performance in a middle-distance (e.g. 3000 m) race by runners with similar $\dot{V}O_{2max}$ values. Hence, 66 competitive athletes with various preferred racing distances (100 m to the 10K) wore portable gas exchange analysers during real competitive races (for 1500 m and 3000 m events) or simulated races (for 100 m, 200 m and 10K distances). When expressed as a proportion of the total aerobic energy production, $E@ \dot{V}O_{2max}$ did not differ significantly when comparing all the distances – from the sprint to the 10 K ($p=0.086$). We found that $E@ \dot{V}O_{2max}$ (when expressed as a proportion of aerobic or total energy production) was correlated with performance for the 3000 m race only ($r = - 0.86$, $p=0.003$ for the aerobic energy contribution;

$r = -0.84$, $p = 0.005$ for total energy production). Hence, energy production at $\dot{V}O_{2\max}$ was a major contributor to the total energy production during middle-distance and even short-distance track runs but was only predictive of performance in the 3000 m. Further research should seek to determine whether this specific energy production at maximal aerobic power is an element of the “unified field” theory of exercise training.

Keywords: aerobic capacity, energy system contribution, oxygen uptake

INTRODUCTION

To date, researchers have sought to quantify the anaerobic and aerobic components of the overall energy required for sprinting through to middle and long-distance running events, with a view to implementing training programmes that optimize the metabolic production of ATP. Specifically with regard to aerobic energy, energy production at $\dot{V}O_{2\max}$ has stimulated new interest following the identification of a $\dot{V}O_2$ slow component during heavy exercise (1). Given that the critical speed has been redefined as the highest speed at which the $\dot{V}O_2$ stabilizes below $\dot{V}O_{2\max}$, the energy at $\dot{V}O_{2\max}$ has been used to define a critical power at $\dot{V}O_{2\max}$ (CP') (26). Billat et al. (7) have shown that $\dot{V}O_{2\max}$ was sustained longest at 140% of the speed that elicited $\dot{V}O_{2\max}$ ($v \dot{V}O_{2\max}$); the purpose of their experiment was to identify the speed that enabled $\dot{V}O_{2\max}$ to be sustained for as long as possible during runs to exhaustion at 90%, 100%, 120% and 140% of $v \dot{V}O_{2\max}$ (7, 26). On the basis of this time limit series; Billat et al. calculated the so-called “critical power at $\dot{V}O_{2\max}$ ” (CP' $\dot{V}O_{2\max}$) as the slope of the distance (d) run at $v \dot{V}O_{2\max}$ in each of these trials vs. the time to exhaustion after $\dot{V}O_{2\max}$ had been attained. (7) This approach circumvented the need for Wilkie's correction. However, to show that the obtained regression slope is indeed the critical velocity, an additional point needs to be proven; the constant term in the regression of d against te at $\dot{V}O_{2\max}$ ($a_0 = 29$ m, in the experiment described by Billat et al.) must be a physiological constant and not a statistical artefact (13). In line with the reasoning summarised above, a_0 (i.e. 29 m) ought to be the distance covered by producing energy derived from anaerobic stores after $\dot{V}O_{2\max}$ has been

attained (13). Nevertheless, this approach dealt with a constant speed at a constant percentage of $\dot{V}O_{2max}$, and the purpose of the experiment was to determine $CP' \dot{V}O_{2max}$ and thus calibrate the intensity of interval training (25). Billat et al. did not look at whether (i) $E@ \dot{V}O_{2max}$ in real sprint and middle-distance runs accounted for the same relative proportion of aerobic energy production, regardless of the distance run, and whether (ii) this relative energy was correlated with performance (even in sprints). Indeed, for sprint races, it had been confirmed that oxidative processes interact rapidly with the overall metabolic supply (19). Therefore, $E@ \dot{V}O_{2max}$ might be of interest even for events as short as the 100 m and 200 m sprints, since it might influence the decrease in speed over time independently of the event's duration. Hence, in the present study, we decided to focus on the product of $\dot{V}O_{2max}$ with its time limit, without considering speed. We therefore sought to determine $E@ \dot{V}O_{2max}$ as a percentage of the total ($E@ \dot{V}O_{2max} \% Etot$) energy production and aerobic energy production ($E@ \dot{V}O_{2max} \% Eaerobic$) at distances ranging from the 100 m sprint to the 10K. Hence, we sought to determine the true relative energetic contributions at $\dot{V}O_{2max}$ for the whole race. More precisely, we hypothesized that $E@ \dot{V}O_{2max}$ is the common energy link between sprinting and long-distance running, and always corresponds to the same proportion of $E@ \dot{V}O_{2max} \% Eaerobic$. We further hypothesized that $E@ \dot{V}O_{2max}$ can predict performance in a middle-distance race (such as the 3000 m) among athletes with similar $\dot{V}O_{2max}$ values.

PARTICIPANTS

Sixty-six trained male athletes volunteered to participate in the study (mean \pm standard deviation (SD) age: 32 ± 13 ; weight: 73 ± 9 kg; height: 1.80 ± 0.8 m). The participants' preferred racing distances were variously 100 m (n=13), 200 m (n=13), 800 m (n=8), 1500 m (n=16), 3000 m (n=9), and 10K (n=7). All participants were familiar with treadmill running and $\dot{V}O_{2max}$ testing. The participants performed a $\dot{V}O_{2max}$ test, followed 7 to 14 days later by an actual or simulated race. The study's objectives and procedures were approved by an independent ethics committee (*CPP Sud-Est V*, Grenoble, France; reference: 2018-A01496-

49). All participants were provided with study information and gave their written consent to participation.

METHODS

All participants performed the University Montreal Track Test (UMTT, to determine individual $\dot{V}O_{2\max}$ values) and then ran one or two different races (100 m, 200 m, 800 m, 1500 m, 3000 m or 10K) while wearing a portable breath-by-breath sampling system (K5 (286), COSMED Srl, Rome, Italy) that continuously measured respiratory gases (oxygen uptake [$\dot{V}O_2$], ventilation [\dot{V}_E], and the respiratory exchange ratio). During the 7-to-14-day recovery period between the UMTT and the race, the participants were instructed to continue their training activities as usual. A global positioning system watch (Garmin, Olathe, KS, USA) was used to measure the heart rate and the speed responses (using 5 s averaged data) in each race. In the UMTT, the rating of perceived exertion (RPE, on a scale from 6 (least exertion) to 20 (greatest exertion) was recorded 15 seconds before the end of each stage.

The UMTT

The UMTT was conducted on a 400 m track with cones placed every 20 m. Sound beeps on a pre-recorded soundtrack indicated the moment when the subject had to pass near a cone to maintain the imposed speed. Speed increments were marked by a longer sound. The first step was set to 8.5 km.h⁻¹, with a subsequent increment of 0.5 km.h⁻¹ every minute. When the subject was unable to maintain the imposed running pace and thus failed to reach the cone in time for the beep on two consecutive occasions, the test was over. The speed corresponding to the last completed step was recorded as the $v\dot{V}O_{2\max}$ (km.h⁻¹).

Calculation of the relative energy production

The net oxygen cost of running (Cr) is defined as the oxygen equivalent of the energy required above resting (estimated by $\dot{V}O_2 - \dot{V}O_{2rest}$) to transport the subject's body over one unit of distance (15).

$$Cr = \dot{V}O_2 - \dot{V}O_{2rest} / v$$

where $\dot{V}O_2$ is the oxygen uptake at the mean velocity v , expressed in ml per kg bodyweight per minute. Given that the runners were not truly at rest before the race, we assumed that $\dot{V}O_{2rest}$ was $5 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (according to the intercept of the $\dot{V}O_2$ -speed regression line obtained by Medbo and Tabata (23, 24)). v is the velocity in m per minute, and thus Cr is the oxygen cost of running in ml O_2 per kilogram per meter (estimated by the oxygen uptake at submaximal speed). The oxygen uptake as a function of the speed during the race ($\dot{V}O_{2demand}$) was calculated as $v \times Cr$, where v is the racing speed (15). This equation assumes that the energy cost of running is independent of the running velocity, according to di Prampero (14) and others (33). This assumption is also a validity condition for the critical power (speed) model and its derivatives (25). At these speeds, the aerodynamic component of the energy cost of running has the same order of magnitude as the experimental measurement error (~5%) (6). Exercise O_2 uptake was converted as 1 litre of $O_2 = 21.1 \text{ kJ}$.

During the race, the cumulative O_2 deficit (in mLO_2/kg) was calculated every 5 s as (Hill et al., 1998):

$$\sum (\dot{V}O_{2demand} - \dot{V}O_2)$$

The cumulative O_2 deficit was then calculated as the sum of all the 5-s oxygen deficits during the race.

The aerobic energy contribution was calculated as ($J.s^{-1}.kg^{-1}$):

$$\frac{\dot{V}O_2}{60} \times 21,1$$

The oxygen required was calculated as ($J.s^{-1}.kg^{-1}$):

$$\frac{\dot{V}O_{2max}}{v\dot{V}O_{2max}} \times v \times 21,1 \times t$$

The anaerobic energy contribution was calculated as ($J.s^{-1}.kg^{-1}$):

$$\left(\frac{\left(\frac{\dot{V}O_{2max}}{v\dot{V}O_{2max}} \times v \right) - (\dot{V}O_2)}{60} \right) \times 21,1 \times t$$

The total metabolic cost (Etot) was calculated as ($J.s^{-1}.kg^{-1}$):

$$\sum Eaérobic + \sum Eanaérobic$$

where v is the mean speed for the race (in $km.h^{-1}$), $v\dot{V}O_{2max}$ is the speed associated with $\dot{V}O_{2max}$ during the UMTT ($km.h^{-1}$), $\dot{V}O_2$ is the mean oxygen consumption, $\dot{V}O_{2max}$ is the maximal oxygen consumption during the UMTT ($mL.kg^{-1}.min^{-1}$), and t is the race time (s).

Lastly, $E@ \dot{V}O_{2max}$ was calculated as:

$$\sum Eaérobic \times Tlim@ \dot{V}O_{2max}$$

where $E@ \dot{V}O_{2max}$ was the energy production at $\dot{V}O_{2max}$ ($J.s^{-1}.kg^{-1}$), $Tlim$ at $\dot{V}O_{2max}$ was the time spent at maximal oxygen consumption and $\dot{V}O_{2max}$ was the maximal oxygen consumption during the UMTT ($mL.kg^{-1}.min^{-1}$).

STATISTICAL ANALYSIS

All statistical analyses were performed using XLSTAT software (version 2019.1.1, Addinsoft, Paris, France). For each variable, the normality and homogeneity of the data distribution were examined in a Shapiro-Wilk test. An independent two-sample t-test was used to compare the various race distances in terms of performance variables (International Association of Athletics Federations (IAAF) score, race time, maximal aerobic velocity (MAV), $\dot{V}O_{2max}$, and post-run blood lactate level). A one-way analysis of variance was used to assess the contribution of $E@ \dot{V}O_{2max} \% E_{aerobic}$. Pearson's coefficient (r) was used to qualify the correlations between performance, $E@ \dot{V}O_{2max} \% E_{tot}$, $E@ \dot{V}O_{2max} \% E_{aerobic}$, and $E_{aerobic} \% E_{tot}$.

RESULTS

Performance and $\dot{V}O_{2max}$ values achieved in each race

The participants' performances and $\dot{V}O_{2max}$ values are summarized in Tables 1 and 2. There were significant differences in $\dot{V}O_{2max}$ between participants who ran the 800 m and those who ran the sprints, 3000 m, and 10K ($p < 0.0001$, $p < 0.0001$, and $p = 0.0002$, respectively). $\dot{V}O_{2max}$ was significantly higher in the participants who ran the 10K than in the sprinters and the 3000 m runners ($p < 0.0001$ and $p < 0.0001$, respectively). Our data for the IAAF score showed that there were significant differences between the sprints on one hand and the 800 m, 1500 m, 3000 m, and 10K distances on the other (Table 1). The sprinters had a higher IAAF score and a lower MAV than the other runners. Lastly, it is important to note that at least 89% of runners at each distance achieved their $\dot{V}O_{2max}$. In contrast, the mean race speed was correlated with the time needed to reach $\dot{V}O_{2max}$ for the 3000 m runners ($r = -0.88$, $p = 0.001$) only.

TABLE 1 : Descriptive characteristics of the participants

Distance	n	MAV	$\dot{V}O_{2max}$ (mL·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)
100 m	13	15.4 ± 1.6	53.1 ± 5.5
200 m	13	15.4 ± 1.6	53.1 ± 5.5
800 m	8	19.3 ± 0.7 ^{ab}	64.6 ± 3.4 ^{ab}
1500 m	16	17.8 ± 2.2 ^{ab}	59.0 ± 10.5
3000 m	9	16.2 ± 1.0 ^{abc}	51.1 ± 5.3 ^{cd}
10000 m	7	19.1 ± 1.8 ^{abe}	67.0 ± 6.5 ^{abe}

Abbreviations; $\dot{V}O_{2max}$, maximal oxygen consumption; MAV, maximal aerobic velocity.

Note: ^a indicates a significant difference (p<0.05) vs. 100 m, ^b200 m, ^c800 m, ^d1500 m and ^e3000 m. The data are quoted as the mean ± SD.

TABLE 2 : Descriptive the participants' performance and $\dot{V}O_{2max}$ achieved during a race

Distance	n	IAAF score	Race time (s)	$\dot{V}O_{2max}$ Reached (n)	Time needed to reach $\dot{V}O_{2max}$ (s)	Post-run lactate (mmol.L ⁻¹)
100 m	13	799.0 ± 143.5	11.3 ± 0.5	10	7.5 ± 1.4	14.0 ± 2.8
200 m	13	795.5 ± 135.51	23.0 ± 1.1	11	15.3 ± 3.3	14.9 ± 1.5
800 m	8	563.0 ± 131.0 ^{ab}	129.0 ± 6.4	8	100.7 ± 21.7	15.9 ± 1.7
1500 m	16	474.6 ± 191.8 ^{ab}	279.8 ± 24.7	15	139.8 ± 78.8	12.4 ± 1.8 ^{bc}
3000 m	9	472.2 ± 218.8 ^{ab}	606.5 ± 60.9	8	265.6 ± 154.9	11.7 ± 2.3 ^{bc}
10000 m	7	522.4 ± 242.5 ^{ab}	2181.3 ± 259.8	7	1501.7 ± 564.6	/

Abbreviations: IAAF, International Association of Athletics Federations; $\dot{V}O_{2max}$, maximal oxygen consumption.

Note: ^a indicates a significant difference (p<0.05) vs. 100 m, ^b200 m, ^c800 m, ^d1500 m and ^e3000 m. The data are quoted as the mean ± SD.

Contributions from the different energy parameters, from 100 m to the 10 K

$E@ \dot{V}O_{2max}$ %Eaerobic did not differ significantly when we compared all the distances (i.e. from 100m to 10 K; p = 0.086; Figure 1). The relative aerobic energy production at $\dot{V}O_{2max}$ was significantly correlated with the mean speed (p=0.045). However, this correlation was not linear, and Pearson's r was 0.25. Therefore, when testing the correlation between energy and performance for each distance, the only distance at which the relative energy production at

$\dot{V}O_{2max}$ was significantly correlated with performance was the 3000 m run (Figures 2 and 3).
Pearson's r was -0.84 ($p=0.005$) for $E@ \dot{V}O_{2max} \%Etot$ and -0.86 ($p=0.003$) for $E@ \dot{V}O_{2max} \%Eaerobic$.

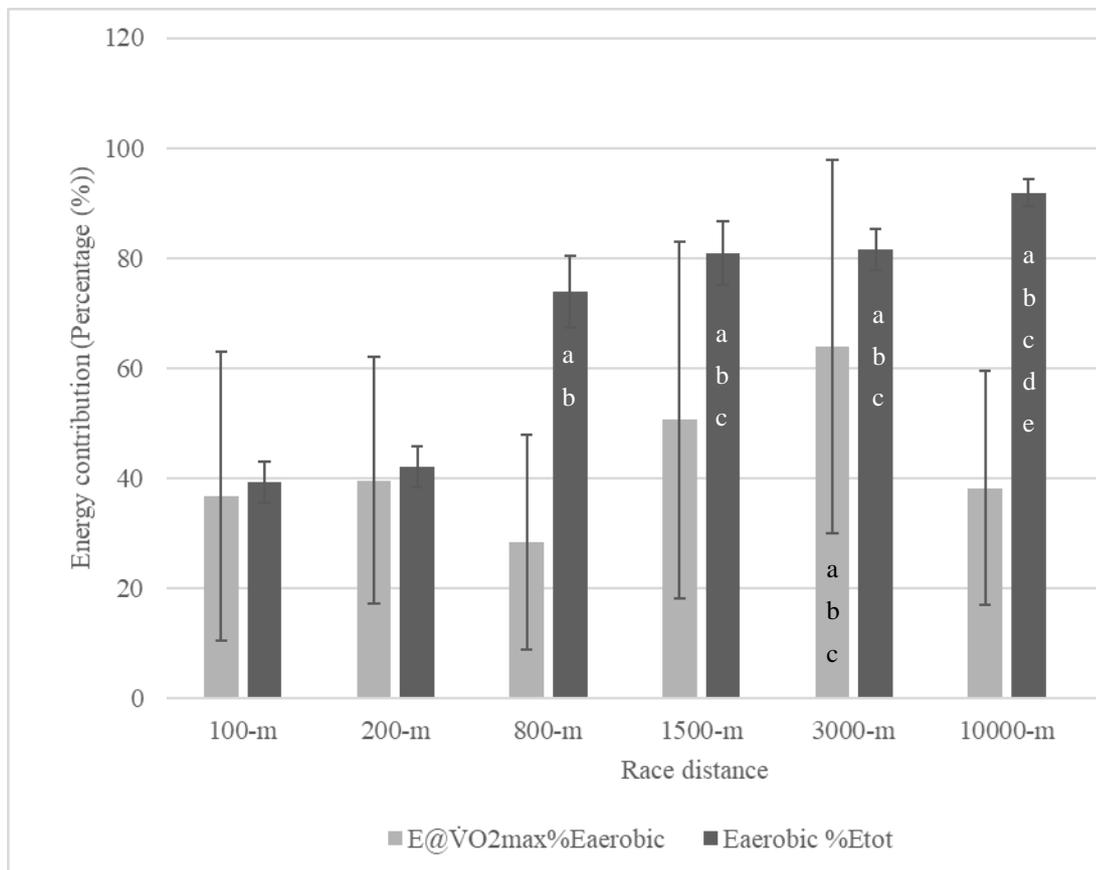


Figure 1 : The relative contribution of aerobic energy production at each race distance. Abbreviations: $E@ \dot{V}O_{2max}$, energy produced when the subject was at $\dot{V}O_{2max}$; $Eaerobic$, aerobic energy produced; $Etot$, total energy produced.

Note: ^a indicates a significant difference ($p < 0.05$) with 100 m, ^b 200 m, ^c 800 m, ^d 1500 m, ^e 3000 m. The data are quoted as the mean \pm SD.

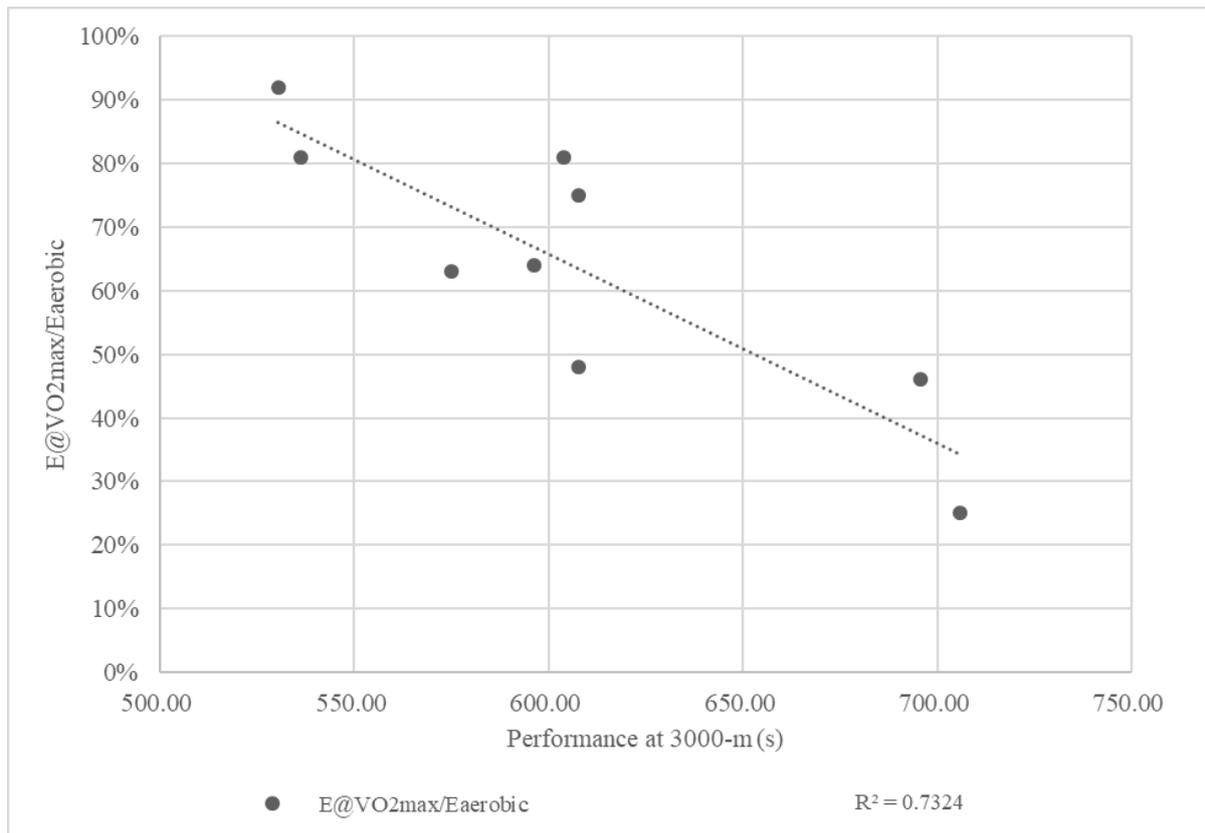


Figure 2 : Correlation between the relative aerobic energy produced when the subject was at $\dot{V}O_{2max}$ ($E@ \dot{V}O_{2max}/E_{aerobic}$) and performance in the 3000 m race

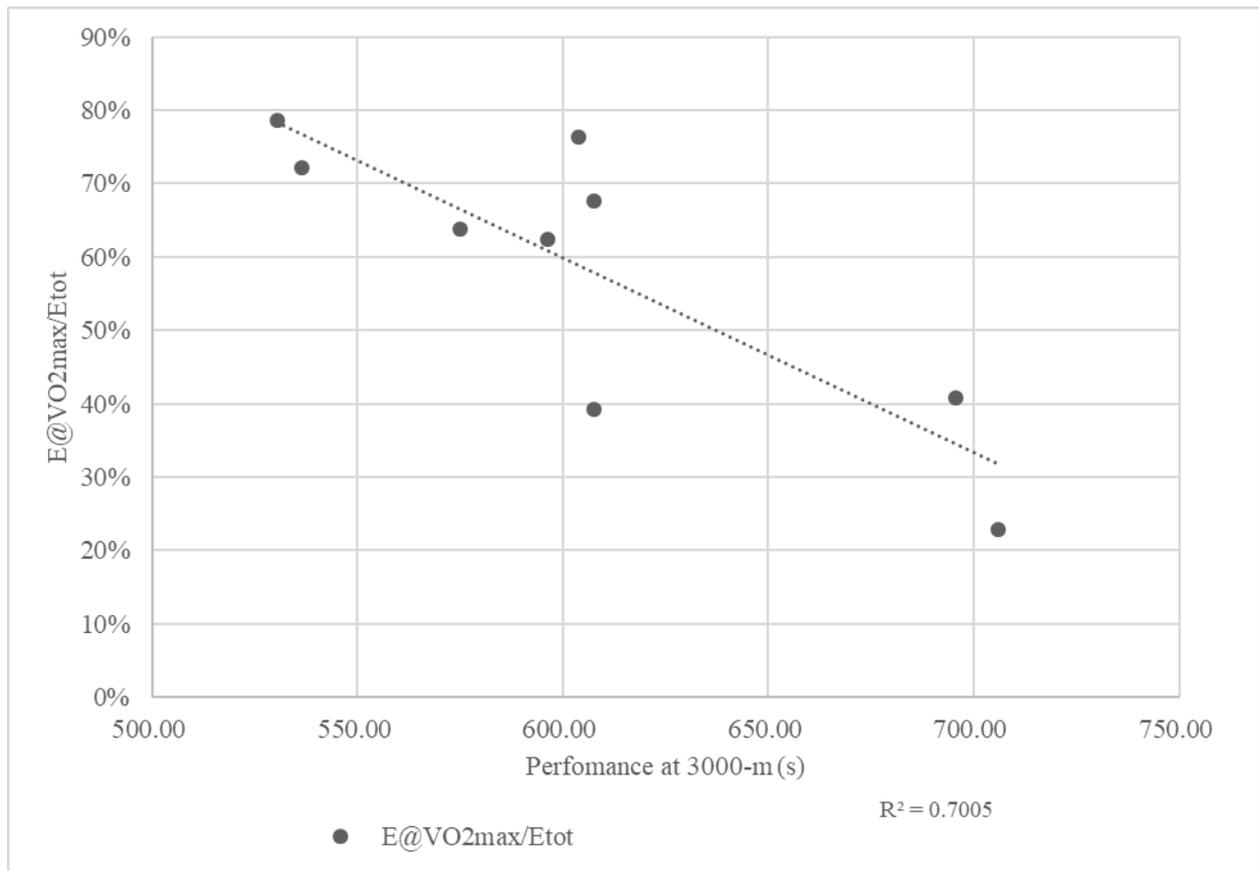


Figure 3 : Correlation between the relative total energy produced when the subject was at $\dot{V}O_{2max}$ ($E@ \dot{V}O_{2max}/E_{tot}$) and performance in the 3000 m race

DISCUSSION

The primary objective of the present study was to determine whether or not the energy production at the highest aerobic power ($E@ \dot{V}O_{2max}$) was the common energy link between short- and long-distance running (from 100 m to the 10 K). Unsurprisingly, aerobic metabolism was the major energy supply pathway for all events over 400 m; our findings are in line with the literature data on sprinting in real or simulated races in the field (16, 34, 36). In an earlier report on the aerobic power, anaerobic power and total power generated during all-out cycling efforts lasting from 5 s to 6 minutes (36), the proportion of aerobic energy production at $\dot{V}O_{2max}$ did not differ significantly from our data recorded during running events (13% and 83% for events lasting 10 seconds and 6 minutes, respectively). However, middle-distance races are not all-out efforts; they are based on (i) a pacing strategy related to the rating of perceived exhaustion and the estimated time to

exhaustion, (10, 18), and (ii) tactical considerations, given that the 800 and 1500 m runs in the present study were actual competitive races (21, 32, 35).

In fact, the speed variations over the first 70% of a middle-distance race serve to maintain a constant time to exhaustion at the runner's instantaneous anaerobic power (5). This observation is consistent with the hypothesis whereby running speed at any instant is controlled by the remaining anaerobic stores (according to the critical power model) (26). Despite this difference for exercise bouts lasting longer than 30 seconds, we nevertheless found that the proportion of aerobic energy produced at $\dot{V}O_{2max}$ was the same in sprints, middle-distance runs, and long-distance (10 K) runs. Hence, the energy produced at $\dot{V}O_{2max}$ might be a major limiting factor for sustainable muscle performance. Indeed, the sustainable work rate is determined by muscle fatigue because of the build-up of the by-products of ATP supply and the products of glycolysis. This build-up is not the limiting factor for very short events like the sprint. Indeed, energy produced at $\dot{V}O_{2max}$ depends on the time taken to reach $\dot{V}O_{2max}$ (2, 4). Sprint exercise accelerates the change in oxygen levels by rapidly depleting creatine phosphate (the cell's storage form for high-energy phosphate); the sprint athlete reaches $\dot{V}O_{2max}$ in less than 10 seconds (20, 29). This may also explain why the energy production at $\dot{V}O_{2max}$ in a sprint is non-negligible (14%). This new insight into energy contributions during running is a novel way of considering the role of $\dot{V}O_{2max}$ and the associated energy production in all types of exercise, without needing to distinguish between the aerobic and anaerobic systems. Energy produced at $\dot{V}O_{2max}$ could be a gold standard for athletes because it is a quantifiable link between glycolysis and oxidative phosphorylation. High energy production at $\dot{V}O_{2max}$ might help to limit the accumulation of the glycolysis products that would otherwise inhibit the signal for oxidative oxidation (12). Inorganic phosphate and H^+ are respectively produced by the breakdown of creatine phosphate and by glycogenolysis (which generates H^+ and lactate if the pyruvate produced is not oxidized) (22). Muscle force often declines well before the ATP stores in the muscle are depleted, indicating that fatigue (rather than the ATP supply) limits power output under these conditions. As a result, the high-flux pathways that generate ATP to meet maximal

power output demands also generate high levels of by-products, which in turn reduce the power output (12). Sprinting and middle-distance running do not differ significantly in terms of the blood lactate profile, and the anaerobic speed reserve is reportedly to be a key component of elite male 800 m running (31).

Sustained power output for more a few minutes is characterised by constant muscle force production and a continuous supply of ATP - both of which reflect the effects of mitochondrial oxidative phosphorylation. Mitochondria recycling of the phosphocreatine breakdown products and oxidation of the glycolytic products ensure that the metabolite levels stabilize at values that enable sustained muscle force production (30). The mitochondria's dual role indicates that sustainable power output is determined by the ATP supply in the muscle (12). It should be borne in mind that the field of exercise physiology was initially built on the "constant power" paradigm, to which physiological responses (as in the determination of $\dot{V}O_{2max}$) were then linked. However, earlier studies had shown that a variable speed model or even a decremental speed mode significantly increased the time spent at $\dot{V}O_{2max}$ (3, 6, 17, 25).

The energy produced at $\dot{V}O_{2max}$ was significantly higher in the 3000 m race (64% of the total energy) than at other distances. Our estimate of aerobic energy as a proportion of total energy production (82%) was similar to the value of 86% reported by Duffield et al. (17). The same was true for the post-exercise blood lactate level (10 mM here vs. 11 mM in Duffield et al.'s study), showing that this race distance is a true compromise between very high aerobic contributions and very high anaerobic contributions, with high energy production at $\dot{V}O_{2max}$. This corresponds to the average power at which the highest time to exhaustion at $\dot{V}O_{2max}$ is obtained, based on a model of the maximal endurance time at $\dot{V}O_{2max}$ (26) and experimental data from 90% to 140% of $v\dot{V}O_{2max}$ (8, 9). In accordance with our hypothesis, $E@ \dot{V}O_{2max}$ was also a factor of interest for predicting performance in the 3000 m by runners with similar $\dot{V}O_{2max}$ values.

Lactate and proton production can occur without the risk of fatigue, since a middle-distance runner's better blood supply will continuously remove lactic acid into the blood. Once in the

circulation, lactic acid can be effectively buffered and eventually removed by oxidation (much more so at $\dot{V}O_{2\max}$) within other muscles (e.g. the heart) or converted back into glucose via gluconeogenesis in the liver (11). This enables fast-twitch (sprint) fibres to contribute to the middle-distance runner's power output; since they have greater individual power outputs than slow-twitch (endurance) fibres, it may be advantageous for these athletes to have muscles with both types of fibre (27). The objective of the present study was to quantify the relative contributions of energy productions at $\dot{V}O_{2\max}$ during actual track running at distances ranging from 100 m to the 10 K. Few studies of the energy systems' contributions to track running have focused on the event distance; this is especially the case for studies in which all the measurements were performed during actual track running events. This is why we decided to examine energy contributions at $\dot{V}O_{2\max}$ - a factor that limits the time spent at $\dot{V}O_{2\max}$ during athletics track events from 100 to 3000 m. Although we still do not know whether the energy produced at $\dot{V}O_{2\max}$ is a limiting factor *per se*, we suggest that it is the best compromise between aerobic and anaerobic sources; being at $\dot{V}O_{2\max}$ requires a high glycolysis flux, high power output, and thus high strength. The energy produced at $\dot{V}O_{2\max}$ reflects metabolic synchronisation; our present results highlighted an integrated approach to metabolic assessment during a true field-based effort (i.e. an actual race).

DISCLOSURES

None of the authors have conflicts of interest associated with the present work. Claire Molinari received a CIFRE PhD fellowship, funded by BillaTraining. The work did not receive any significant funding that could have influenced its outcome.

REFERENCES

1. Barstow TJ, Mole PA. Linear and nonlinear characteristics of oxygen uptake kinetics during heavy exercise. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985 71: 2099–2106, 1991.
2. Beneke R, Böning D. The limits of human performance. *Essays Biochem* 44: 11–26, 2008.
3. Billat LV, Koralsztein JP. Significance of the velocity at $VO_{2\max}$ and time to exhaustion at this velocity. *Sports Med Auckl NZ* 22: 90–108, 1996.
4. Billat LV, Koralsztein JP, Morton RH. Time in human endurance models. From empirical models to physiological models. *Sports Med Auckl NZ* 27: 359–379, 1999.

5. Billat V, Hamard L, Koralsztein JP, Morton RH. Differential modeling of anaerobic and aerobic metabolism in the 800-m and 1,500-m run. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985 107: 478–487, 2009.
6. Billat V, Petot H, Karp JR, Sarre G, Morton RH, Mille-Hamard L. The sustainability of VO₂max: effect of decreasing the workload. *Eur J Appl Physiol* 113: 385–394, 2013.
7. Billat VL, Blondel N, Berthoin S. Determination of the velocity associated with the longest time to exhaustion at maximal oxygen uptake. *Eur J Appl Physiol* 80: 159–161, 1999.
8. Billat VL, Morton RH, Blondel N, Berthoin S, Bocquet V, Koralsztein JP, Barstow TJ. Oxygen kinetics and modelling of time to exhaustion whilst running at various velocities at maximal oxygen uptake. *Eur J Appl Physiol* 82: 178–187, 2000.
9. Blondel N, Berthoin S, Billat V, Linsel G. Relationship between run times to exhaustion at 90, 100, 120, and 140% of vVO₂max and velocity expressed relatively to critical velocity and maximal velocity. *Int J Sports Med* 22: 27–33, 2001.
10. Borg GA. Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc* 14: 377–381, 1982.
11. Brooks GA. Bioenergetics of Exercising Humans. In: *Comprehensive Physiology*. American Cancer Society, p. 537–562.
12. Conley KE, Kemper WF, Crowther GJ. Limits to sustainable muscle performance: interaction between glycolysis and oxidative phosphorylation. *J Exp Biol* 204: 3189–3194, 2001.
13. di Prampero PE. The concept of critical velocity: a brief analysis. *Eur J Appl Physiol* 80: 162–164, 1999.
14. di Prampero PE. Factors limiting maximal performance in humans. *Eur J Appl Physiol* 90: 420–429, 2003.
15. Di Prampero PE, Capelli C, Pagliaro P, Antonutto G, Girardis M, Zamparo P, Soule RG. Energetics of best performances in middle-distance running. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985 74: 2318–2324, 1993.
16. Duffield R, Dawson B. Energy system contribution in track running. 2003.
17. Duffield R, Dawson B, Goodman C. Energy system contribution to 400-metre and 800-metre track running. *J Sports Sci* 23: 299–307, 2005.
18. Garcin M, Billat V. Perceived exertion scales attest to both intensity and exercise duration. *Percept Mot Skills* 93: 661–671, 2001.
19. Gatin PB. Energy System Interaction and Relative Contribution During Maximal Exercise. *Sports Med* 31: 725–741, 2001.
20. Heubert RAP, Billat VL, Chassaing P, Bocquet V, Morton RH, Koralsztein JP, di Prampero PE. Effect of a previous sprint on the parameters of the work-time to exhaustion relationship in high intensity cycling. *Int J Sports Med* 26: 583–592, 2005.
21. Léger LA, Ferguson RJ. Effect of pacing on oxygen uptake and peak lactate for a mile run. *Eur J Appl Physiol* 32: 251–257, 1974.

22. Mader A, Heck H. A theory of the metabolic origin of “anaerobic threshold.” *Int J Sports Med* 7 Suppl 1: 45–65, 1986.
23. Medbo JI, Mohn AC, Tabata I, Bahr R, Vaage O, Sejersted OM. Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. *J Appl Physiol* 64: 50–60, 1988.
24. Medbo JI, Tabata I. Relative importance of aerobic and anaerobic energy release during short-lasting exhausting bicycle exercise. *J Appl Physiol* 67: 1881–1886, 1989.
25. Morton RH, Billat LV. The critical power model for intermittent exercise. *Eur J Appl Physiol* 91: 303–307, 2004.
26. Morton RH, Billat V. Maximal endurance time at VO₂max. *Med Sci Sports Exerc* 32: 1496–1504, 2000.
27. Newsholme EA. Application of principles of metabolic control to the problem of metabolic limitations in sprinting, middle-distance, and marathon running. *Int J Sports Med* 7 Suppl 1: 66–70, 1986.
28. Perez-Suarez I, Martin-Rincon M, Gonzalez-Henriquez JJ, Fezzardi C, Perez-Regalado S, Galvan-Alvarez V, Juan-Habib JW, Morales-Alamo D, Calbet JAL. Accuracy and Precision of the COSMED K5 Portable Analyser. *Front Physiol* 9, 2018.
29. Prampero PE, Francescato MP, Cettolo V. Energetics of muscular exercise at work onset: the steady-state approach. *Pflugers Arch* 445: 741–746, 2003.
30. Sahlin K. High-Energy Phosphates and Muscle Energetics. *Princ Exerc Biochem* 46: 87–107, 2004.
31. Sandford GN, Allen SV, Kilding AE, Ross A, Laursen PB. Anaerobic Speed Reserve: A Key Component of Elite Male 800-m Running. *Int J Sports Physiol Perform* 14: 501–508, 2019.
32. Sandford GN, Pearson S, Allen SV, Malcata RM, Kilding AE, Ross A, Laursen PB. Tactical Behaviors in Men’s 800-m Olympic and World-Championship Medalists: A Changing of the Guard. *Int J Sports Physiol Perform* 13: 246–249, 2018.
33. Saunders PU, Pyne DB, Telford RD, Hawley JA. Factors Affecting Running Economy in Trained Distance Runners. *Sports Med* 34: 465–485, 2004.
34. Spencer MR, Gastin PB. Energy system contribution during 200 to 1500 m running in highly trained athletes. In: *Medicine and Science in Sports and Exercise* 33. 2001, p. 157–162.
35. Thiel C, Foster C, Banzer W, Koning JD. Pacing in Olympic track races: Competitive tactics versus best performance strategy. *J Sports Sci* 30: 1107–1115, 2012.
36. Weyand PG, Lin JE, Bundle MW. Sprint performance-duration relationships are set by the fractional duration of external force application. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 290: R758-765, 2006.

A travers cette deuxième étude, nous nous sommes aperçus que l'énergie à $\dot{V}O_{2max}$ exprimée en pourcentage d'énergie aérobie était un élément commun aux différentes distances dès lors qu'elles étaient réalisées comme un effort maximal. Cette étude a notamment mis en évidence que l'énergie à $\dot{V}O_{2max}$ serait le facteur limitant de la performance. La course de 3000m était le compromis de l'utilisation des ressources maximales en aérobie et anaérobie. De plus seule la performance sur cette distance est corrélée à l'énergie à $\dot{V}O_{2max}$.

La reproductibilité des signaux physiologiques lors de notre test RABIT® (article 1) et la corrélation de l'énergie à $\dot{V}O_{2max}$ avec une performance, renforce notre hypothèse selon laquelle, les variables physiologiques pourraient être les variables de contrôle de la stratégie de course intégrée dans un *central gouverneur*.

Pour mieux comprendre les mécanismes de contrôle chez les non élites, dans un contexte réel de course à pied, nous avons choisi d'étudier le 3000m, car la vitesse sur cette distance est proche de la puissance maximale pour laquelle il est encore possible d'obtenir un état stable de la consommation d'oxygène à une valeur significativement inférieure à $\dot{V}O_{2max}$ (133). Ainsi, dans notre troisième étude sur la performance sur 3000m, la vitesse et les réponses cardiorespiratoires seront contrôlées isolément.

Nous gardons l'objectif de l'effort maximal similaire à la compétition, ainsi les coureurs doivent réaliser un 3000m le plus vite possible. Nous réalisons en quelque sorte de la physiologie imposée au *gouverneur central* puisque nous partons des valeurs moyennes que le coureur a réalisé lors d'un 3000m guidé par ses sensations dans l'optique d'effectuer la meilleure performance possible. Par exemple, nous imposons à nos coureurs leur propre fréquence cardiaque moyenne, à contrario des études menés dans la littérature qui estiment un pourcentage de fréquence cardiaque censé représenter une zone d'effort prédéterminée.

3.3 La vitesse contrôlée par un état stable physiologique permet de courir plus rapidement un 3000 m

3.3.1 Résumé

Objectif : Le but de cette étude est de vérifier l'hypothèse selon laquelle la course à une allure libre n'est pas optimale comparée à une allure contrôlée par un état physiologique stable. Méthode : Huit coureurs de demi-fond ont effectué quatre 3000 m. Le premier essai (TT1) consistait en une course libre de 3000 m, les participants devaient réaliser la meilleure performance. Dans les tests suivants, nous avons contrôlé l'allure afin que les épreuves de 3000 m se déroulent à la même vitesse moyenne (TT2), $\dot{V}O_2$ moyenne (TT3) ou FC moyenne (TT4) que lors de la course libre (TT1). Résultats : lorsque les états physiologiques étaient contrôlés, les performances étaient améliorées (740 ± 34 et 748 ± 33 pour TT3 et TT4 contre 854 ± 53 secondes avec TT1, $p < 0,01$), le coût en oxygène (200 ± 5 et 220 ± 3 vs 310 ± 5 mL O_2 .kg $^{-1}$.km $^{-1}$, $p < 0,02$) et le coût cardiaque ($0,69 \pm 0,08$ et $0,69 \pm 0,04$ vs $0,86 \pm 0,09$ battement.m $^{-1}$ $p < 0,01$) étaient réduits. De plus, la distribution de vitesse a été modifiée, une augmentation de la distribution d'asymétrie de vitesse (asymétrie positive) ($1,7 \pm 0,9$ et $1,3 \pm 0,6$ vs. $0,2 \pm 0,4$, $p < 0,05$) a été observée. Conclusion : un contrôle des états physiologiques de $\dot{V}O_2$ ou FC à des valeurs équivalentes à la valeur moyenne de la course libre, permet aux coureurs d'améliorer leurs performances avec une distribution de la vitesse plus favorable, et une contrainte physiologique plus faible pour une vitesse donnée, que la vitesse libre. Cela suggère que les coureurs non élites ne choisissent pas spontanément la meilleure stratégie de course.

Ce travail fait l'objet d'un article soumis au Journal of Sports Sciences. Il sera soumis comme poster au Congrès européen de l'European College of Sport Science à Séville en Juillet 2020.

3.3.2 Article 3

1. **Title: Pace controlled by a steady-state physiological variable is associated with better performance in a 3000 m run.**

2. **Full name, postal address, e-mail and telephone number of the corresponding author**

Véronique Louise Billat, 1 rue Lacretelle, F-75015 Paris, France,

veroniquelouisebillat@gmail.com,

3. **Full name, department, institution, city and country of all co-authors**

C. Molinari¹, P. Bresson¹ and V.L. Billat^{2,3}

1. UBIAE, Université d'Evry, Université Paris-Saclay, F-91025 Evry, France

2. Université d'Evry, Université Paris-Saclay, F-91025 Evry, France

3. I3SP, Université de Paris, Université Paris Descartes, F-75015 Paris, France.

ABSTRACT

Objective: To test the hypothesis whereby freely chosen running pace is less effective than pace controlled by a steady-state physiological variable. **Design:** Eight middle-distance runners performed four maximum-effort 3000 m time trials on a running track. The first time trial (TT1) was freely paced. In the following 3000 m time-trials, the pace was controlled so that the average speed (TT2), average $\dot{V}O_2$ (TT3) or average HR (TT4) recorded in TT1 was maintained throughout the time trial. **Results:** Physiologically control pace was associated with a faster time (mean \pm standard deviation: 740 ± 34 seconds for TT3 and 748 ± 33 seconds for TT4, vs. 854 ± 53 seconds for TT1; $p < 0.01$), a lower oxygen cost of running (200 ± 5 and 220 ± 3 vs. 310 ± 5 $\text{mlO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, respectively; $p < 0.02$), a lower cardiac cost (0.69 ± 0.08 and 0.69 ± 0.04 vs. 0.86 ± 0.09 $\text{beat} \cdot \text{m}^{-1}$, respectively; $p < 0.01$), and a more positively skewed speed distribution (skewness: 1.7 ± 0.9 and 1.3 ± 0.6 vs. 0.2 ± 0.4 , $p < 0.05$). **Conclusion:** Physiologically controlled pace (at the average $\dot{V}O_2$ or HR recorded in a freely pace run) was associated with a faster time, a more favorable speed

distribution and lower levels of physiological strain, relative to freely chosen pace. This finding suggests that non-elite runners do not spontaneously choose the best pace strategy.

Keywords: $\dot{V}O_{2\max}$, performance, running, self-pacing, skewness, steady state.

INTRODUCTION

In real races, athletes achieve the best performances by varying their pace ¹. Despite the obvious importance of pacing and the impact of pacing mistakes on athletic performance, there have been few systematic studies of how various pacing strategies influence the outcome of competitive results ². With a view to optimizing athletic performance, various self-pacing strategies have been used to vary the running speed and minimize the overall time between the start and the finish. Therefore, in order to avoid becoming over-fatigued before reaching the finishing line, the athlete can choose to spontaneously modulate his/her pace during the race³. Over the last 20 years, researchers have hypothesized that human athletes regulate their effort during competitive events according to when they expect the exercise bout to end ⁴⁻⁶. In order to maintain homeostasis, the central governor supposedly receives feedback from a receptor that monitors the physiological response to the exercise activity's demands ^{5,7-9}. In line with the “central governor” paradigm of health and performance, free pacing is currently considered to be the key to better performance ⁴. In a race, the choice of the speed variations that will maximize the endurance athlete's ability to win a race involves complex interplay between physiological and psychological factors ¹⁰.

A recent analysis of almost 300 marathon races showed that positive speed asymmetry was associated with better performance ¹¹. One particular example of positive speed asymmetry is the bathtub-shaped curve, in which the runner spends two-thirds of the duration of the race below his/her overall average speed (i.e. after a fast start and before a fast finish). In cases of negative asymmetry, the runner spends much more time (and thus runs further) above his/her overall

average speed ¹¹. It is possible to gain a better understanding of running performance by combining personalized and generalized analyses. Hence, along with “big data” analyses of pacing strategies, it is essential to examine conventional physiological variables in ecological situations that mirror track events.

Middle- and long-distance runs (such as the 3000 m) push human athletes to their endurance limits. The athlete’s various physiological systems interact to regulate the running speed and maintain homeostasis as long as possible ⁵. Indeed, simple physiological markers (such as the heart rate (HR)) are involved in competitive efforts, so that the burden of fatigue is proportional to the distance completed.

In order to better understand these physiological markers and their putative roles as controllers, we designed an experiment in which the pacing strategy in a 3000 m running time trial was controlled by physiological markers (such as maximal oxygen consumption ($\dot{V}O_2$) and HR). We further hypothesized that free pacing is less effective (i.e. slower) in a 3000 m run than a strategy in which pace is controlled by a steady-state physiological variable. Therefore, the objective of the present study was to determine how an imposed, constant $\dot{V}O_2$ or HR (corresponding to the mean value measured in a free-paced trial) would influence overall performance, physiological strain, speed variations, and the speed distribution (asymmetry) over a 3000 m run.

We hypothesized that a non-elite runner can maximize performance and minimize physiological strain by using a steady-state physiological parameter ($\dot{V}O_2$ or HR) to control pace and maintain homeostasis for as long as possible during an effort (a 3000 m run).

PARTICIPANTS

Eight male, trained, non-elite runners (mean \pm standard deviation (SD) age: 36.5 ± 11.8 ; weight: 69.8 ± 4.5 kg; height: 176.1 ± 2.8 cm) volunteered to participate in the study. The study’s objectives and procedures were approved by an institutional review board (CPP Sud-Est V,

Grenoble, France; reference: 2018-A01496-49). All participants were provided with study information, and gave their written consent to participation.

METHODS

Participants individually performed four different 3000 m time trials. All trials were performed at the same time of day (± 2 h), with a recovery time of between 3 and 7 days between trials. Participants were asked to refrain from training during the 24 h preceding each test. All four trials were performed on an officially measured outdoor athletics track.

Trial conditions

The first 3000 m time trial (TT1) was freely paced; all participants were instructed to run as fast as possible at a self-selected pace. The total trial time was measured using a stopwatch. TT1 was the reference trial from which the control variables applied to the following three trials (performed in random order) were determined. In the second 3000 m time trial (TT2), the runner had to maintain a steady-state corresponding to the average speed measured in TT1. In the third time trial (TT3), the runner had to maintain a steady-state $\dot{V}O_2$ corresponding to the average value recorded during TT1. In the fourth time trial (TT4), the runner had to maintain a steady-state HR corresponding to the average value recorded in TT1.

Experimental measurements

Respiratory gases (oxygen uptake [$\dot{V}O_2$] and carbon dioxide production [$\dot{V}CO_2$]) were continuously measured using a telemetric, portable, breath-by-breath sampling system (K5, Cosmed, Rome, Italy)¹². A global positioning system watch (Garmin, Olathe, KS, USA) paired with the K5 system was used to measure the HR and the speed response (using 5 s data averages) throughout each trial.

The K5 long-range telemetry system was used to monitor the steady states in TT3 and TT4. The investigator (in the center of the track) received the data from the K5 and the Garmin system on a laptop computer in real time. He/she could then tell the runner to increase, decrease or maintain his speed in order to maintain the steady state. The runner was able to monitor his instantaneous

speed using the watch. In TT2, the watch had been programmed to give sound alerts (beeps) if the speed deviated by more than 5%. The investigator also monitored the running speed by checking the K5 telemetry system.

Calculated variables

Oxygen cost ($\text{mLO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) was calculated as the ratio between oxygen consumption ($\text{mLO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) and speed (m/min).

The *cardiac cost* ($\text{m}^{-1} \cdot \text{beat}$) of running was calculated as the ratio between the 5-sec-averaged running speed and the 5-sec-averaged HR. This cost ratio corresponds to the distance (m) covered at each beat ¹³.

Statistical analysis

All statistical analyses were performed using XLSTAT software (version 2019.1.1, Addinsoft, Paris, France). All the test variables ($\dot{V}\text{O}_2$, $\dot{V}\text{CO}_2$, HR, and speed) were reported as the mean \pm SD. For each variable, the normality and homogeneity of the data distribution were examined in a Shapiro-Wilk test. Paired t tests were used to examine mean differences between outcome variables (race time, percentage of time spent below average speed (i.e. positive asymmetry), and the cardiac cost). Kendall's τ was calculated in order to detect time trends in physiological and speed responses during the four trials (2,3) Furthermore, we calculated the skewness value of the speed distribution as $(\text{mean} - \text{median})/\text{SD}$. The skewness is a measure of the asymmetry of the probability distribution of a real-valued random variable about its mean. Its value can be positive, negative, or undefined: a positive skew means that the mean is greater than the median, while a negative skew means the mean is less than the median. We compared the time spent below the average speed with the time spent above the average speed. Positivity asymmetry was defined as a run with 54% or more of the time spent below the average speed, and negative asymmetry was defined as a run with 46% or less of the time spent above the average speed ¹¹.

RESULTS

1•) Performance over 3000 m in each time trial

The completion times in the four 3000 m time trials are summarized in Table 1. The completion time was significantly lower in TT3 and TT4 (when pace was based on a constant $\dot{V}O_2$ or HR, respectively) than in the freely paced TT1 ($p=0.009$ and $p=0.002$, respectively). In contrast, the time in TT2 (run at constant speed) did not differ significantly from that in TT1 ($p=0.098$). We conclude that a physiologically controlled pace strategy is associated with better 3000 m running performance.

TABLE 1 : Descriptive characteristics of the participants' performance and physiological strain

Trial	Race time (s)	% Time spent < average speed	Running cost	Cardiac cost
3000 m free-pace (TT1)	854 ± 53	51.9 ± 3.8	0.31 ± 0.05	1.17 ± 0.11
3000 m speed steady state (TT2)	799 ± 60	57.1 ± 6.6 ^a	0.22 ± 0.03 ^a	1.45 ± 0.12 ^a
3000 m $\dot{V}O_2$ steady state (TT3)	740 ± 34 ^a	64.5 ± 8.3 ^a	0.20 ± 0.05 ^a	1.46 ± 0.15 ^a
3000 m HR steady state (TT4)	748 ± 33 ^a	61.1 ± 6.0 ^a	0.22 ± 0.03 ^a	1.45 ± 0.09 ^a

Abbreviations: % Time spent < average speed; percentage of time spent below average speed are positively asymmetric.

Note: ^a indicates a significant difference ($p<0.05$) with 3000 m free-pace (T1). The data are quoted as the mean ± SD.

2•) Physiological strain: oxygen and cardiac costs

The physiological strain (oxygen and cardiac costs, in mlO₂ and beats per meter run, respectively) was significantly lower in TT3 and TT4 than in the freely paced TT1 ($p=0.015$ and $p=0.001$, respectively; Table 1).

3*) Statistical characteristics of speed distribution strategies: skewness, coefficient of variation, and Kendall's τ

The speed distribution was more positively skewed in TT3 and TT4 (respectively 1.7 ± 0.9 and 1.3 ± 0.6 for the skewness, which is a dimensionless number) than in TT1 (0.2 ± 0.4 ; $p < 0.05$) (**Figure 1**). To determine the asymmetric nature of the speed distribution, we calculated the percentage time spent above the runner's average speed and percentage time spent below. All the runners displayed positive speed asymmetry, meaning that they tended to run for longer below their average speed (**Table 1**). The percentage time spent below the average speed was significantly greater when the 3000 m pace was run at constant $\dot{V}O_2$ or HR (TT3 or TT4, respectively) than in the free pace trial (TT1) ($p = 0.025$ and $p = 0.010$, respectively).

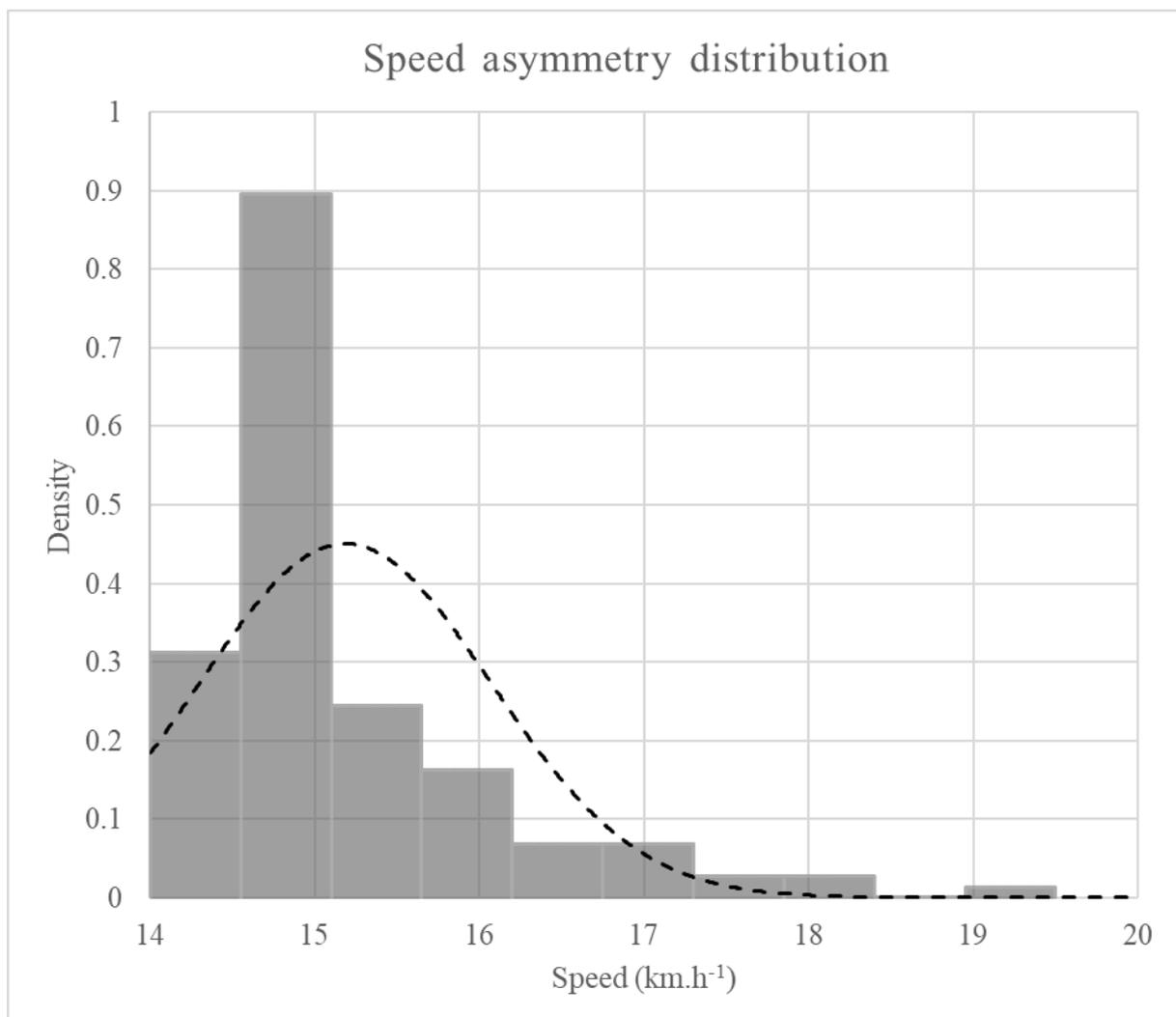
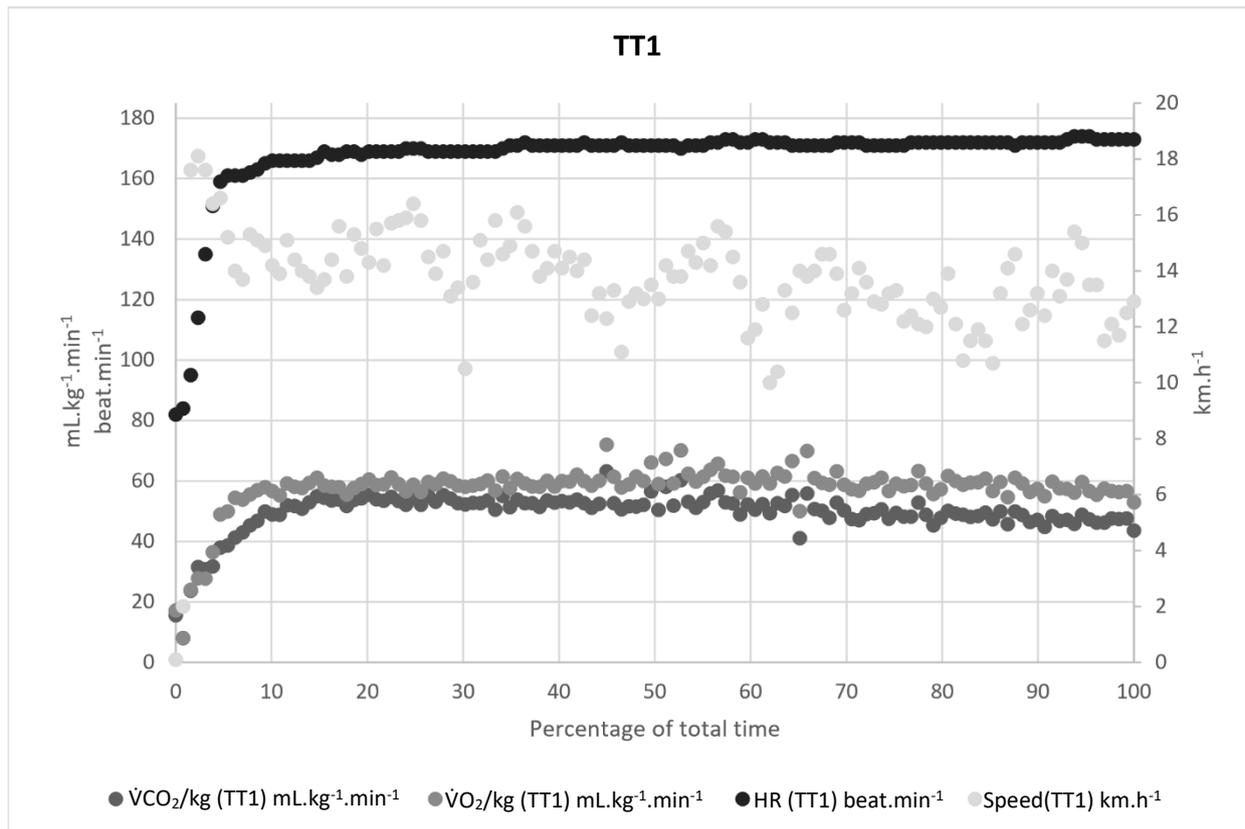
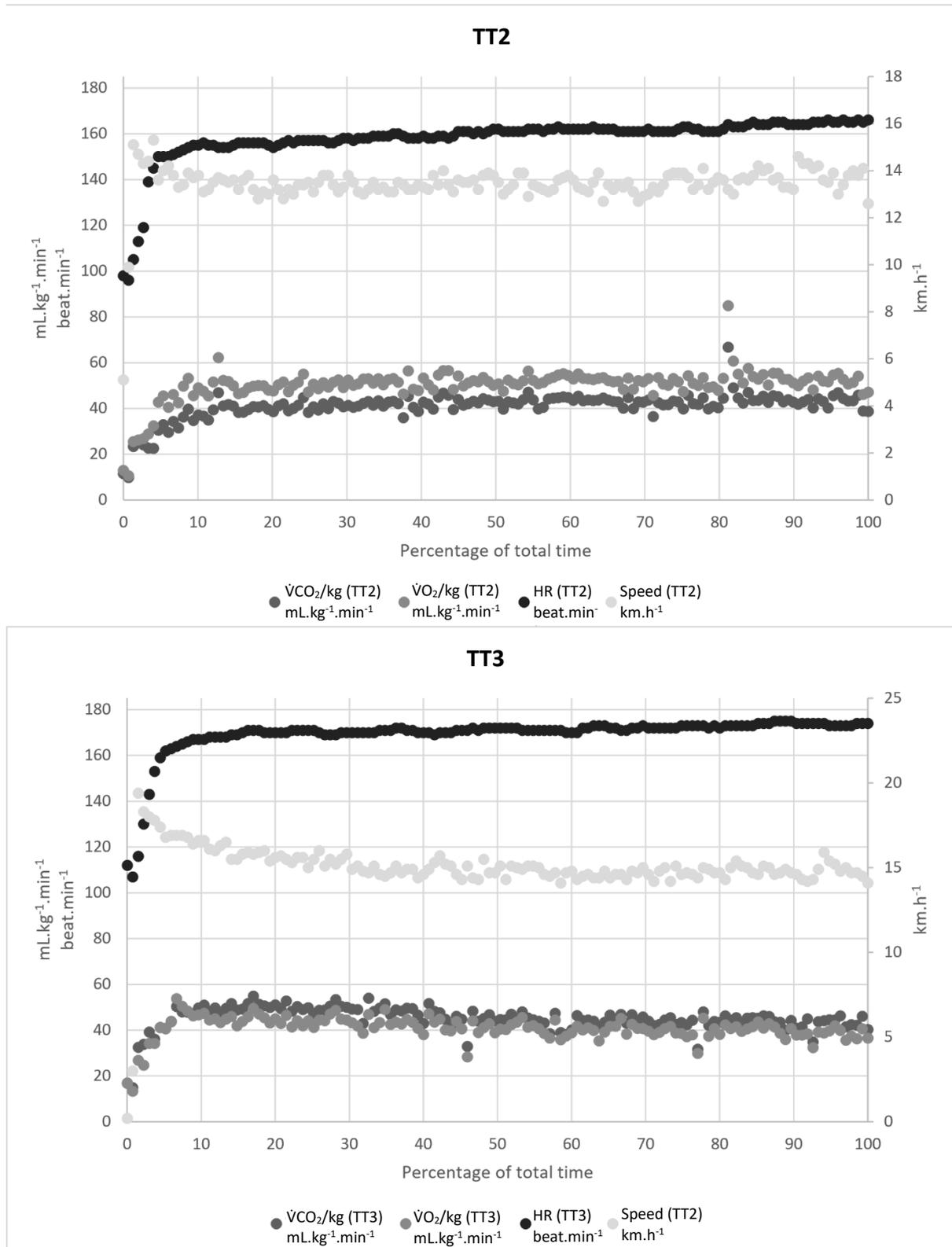


Figure 1 : Example of right/positive-skewed distribution of subject 1 at TT3. The bar chart represents the speed density distribution on 3000 m at TT3.

The speed coefficient of variation was significantly greater in TT1 than in TT4 (14.6 ± 2.5 vs. $7.5 \pm 2.7\%$, respectively; $p = 0.001$). However, there was no significant difference between TT1 and TT3 (14.6 ± 2.5 vs. 9.9 ± 5.1 , respectively; $p=0.077$).

We used Kendall's τ to characterize the time trend in the speed during each trial. We observed a decreasing trend: the mean \pm SD Kendall's τ was -0.273 ± 0.12 for TT1, -0.499 ± 0.22 for TT2, -0.138 ± 0.25 for TT3, and -0.507 ± 0.24 for TT4. Given that all the p-values were below 0.05, we rejected the null hypothesis stating that the speed time trend was constant. The negative Kendall's τ values indicate that the runners slowed progressively during the time trial, regardless of the instructions or controlling variables (**Figure 2**).





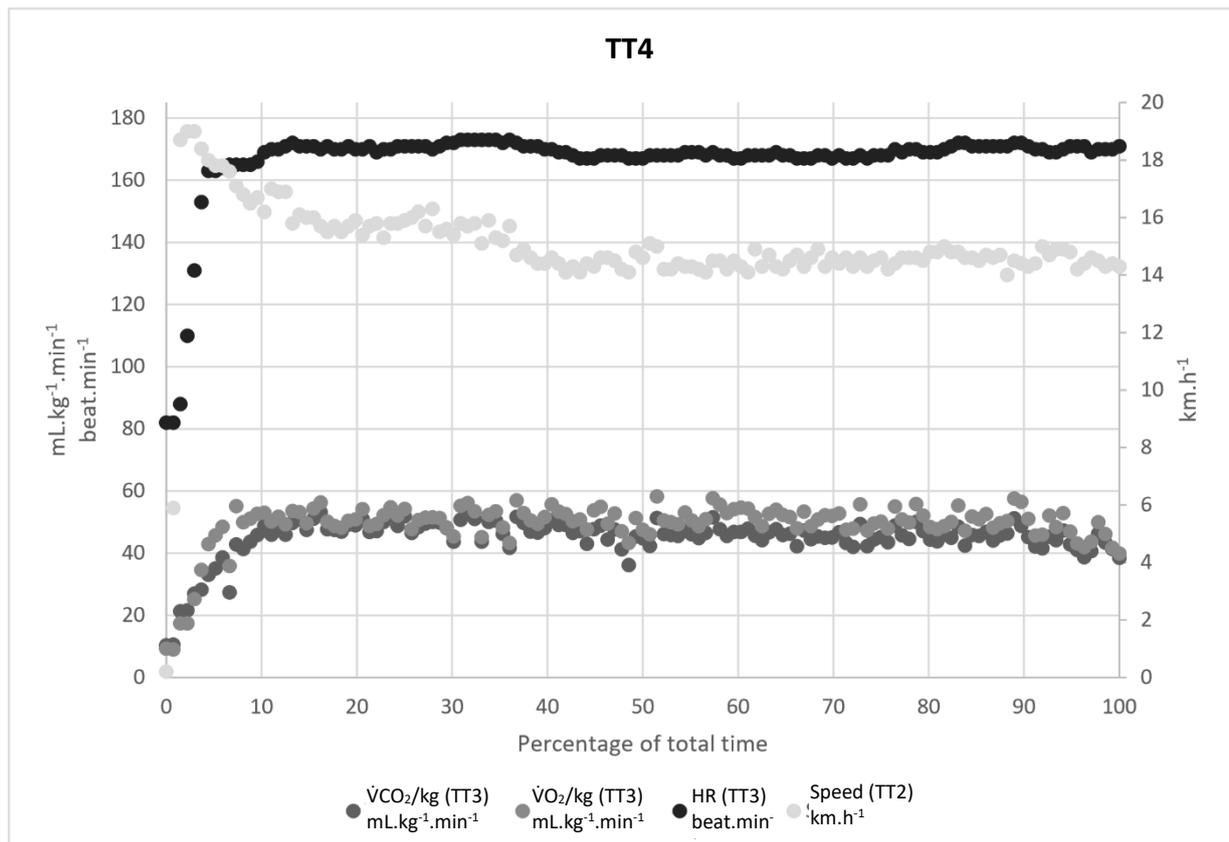


Figure 2 : The example of the subject 1. Respiratory gases (oxygen uptake [$\dot{V}O_2$] and carbon dioxide production [$\dot{V}CO_2$]), heart rate and speed at the percentage of total time to each race profile. A- free-pace 3000 m run (TT1), B- 3000 m speed steady state (TT2), C- 3000 m $\dot{V}O_2$ steady state (TT3), D- 3000 m HR steady state (TT4).

DISCUSSION

Our present results confirmed the hypothesis whereby the imposition of a stable physiological state (for oxygen consumption or HR) optimizes the speed variation pattern. Indeed, the participating runners were significantly faster over 3000m when the pace was controlled by a constant HR or a constant $\dot{V}O_2$. Hence, our results confirmed the hypothesis whereby a spontaneously chosen pace does not enable the non-elite runner to maximize performance or minimize physiological strain. This is in accordance with Katch et al.'s criticism of the widely used Cooper 12-min running endurance test, which was widely used in 1973^{14,15}. The researchers suggested that the Cooper test penalizes less experienced runners because the alternation of running and walking was possible, and the choice of pace was left to the runner'¹⁵. Katch et al. concluded that further

experiments were needed to determine optimal pacing requirements and test durations for endurance running performance ¹⁵.

In the present experiment, we controlled the running pace with reference to $\dot{V}O_2$ or HR. We found that free pacing was not optimal in non-elite runners. Indeed, the runners performed better and experienced lower levels of physiological strain (oxygen and cardiac costs) when the 3000 m time trial was run at a constant $\dot{V}O_2$ or a constant HR (in TT3 and TT4, respectively), relative to the freely pace trial. Furthermore, the runners displayed a positively asymmetric speed distribution and a lower coefficient of variation for speed in TT2, TT3, and TT4. Indeed, the literature data show that positive speed asymmetry and a lower coefficient of variation for speed are associated with better race performance ¹¹.

Historically, the most popular method for observing physiological responses during exercise has been the constant load or fixed-intensity protocol; this is based mainly on the assumption that an organism has a certain threshold response under a given condition. However, constant-load exercise does not wholly allow for haphazardness or variability, since the biological system is overridden by a predetermined, externally imposed load that cannot be altered ¹⁶. Bath et al. ¹⁷ showed that a second runner had no effect on the pacing strategy, running speed, HR or the rating of perceived exertion during a 5 km time trial – even though the athletes thought that their performance had been improved. Hence, Bath et al. ¹⁷ considered that an athlete's subconscious pacing strategy is robust and is not altered by the presence of another runner. That is why we decided to determine whether a physiological steady-state variable could improve performance by forcing the runner to adopt a better “strategy” and perhaps modify his/her speed distribution.

It may now be opportune to explore an ecological approach to exercise limitation by adopting a mechanical control variable (e.g. power, speed, or cadence) or a physiological control variable (HR or $\dot{V}O_2$). In the context of middle-distance running (races over 1500 to 10000 m, lasting between 4 and 15 minutes), speed is not constant; we still do not know how a runner regulates his/her speed to achieve optimal performance and to avoid exhaustion before the end of the race

¹⁸. If one continues to reason along these lines, the use of $\dot{V}O_2$ or HR as a controlling variable might induce an ideal pacing pattern (or at least one that is better than freely chosen pace) - especially in a high-level runner ¹.

Indeed, compared with a constant-pace run, a freely pace run enabled athletes to finish with a sprint; however, the sprint increased performance but was not perceived as being less strenuous ¹⁹. Therefore, according to Foster et al. ²⁰, there is some evidence to suggest that the initial speed and anaerobic energy use was high, and decreased to a more or less constant value over the remainder of the race. This apparent monitoring of the metabolic disturbance vs. the demands of an exercise bout has recently been integrated into a cohesive “teleoanticipation” or “central governor” hypothesis ^{7,9,18}. Therefore, the physiological limits on exercise are frequently studied in situations where (i) the subject is free to regulate his/her pace ^{21,1,18} and (ii) the relationships between speed variations and physiological signals are known. We previously reported that the coefficient of variation for speed ranged from 1% to 5% in 3,000 to 10,000 m events for competitive runners ²², 3% in marathons ²³, and 5.4% for the top ten finishers in a 100 km ultramarathon ²⁴. The coefficient of variation for speed for a recent marathon winner (Eliud Kipchoge) was 2.2%, which testifies to a relatively even pace strategy ²⁵. However, the asymmetry of speed distribution must also be explored.

Maron et al. ²⁶ suggested that speed variations could enable a runner to reach $\dot{V}O_{2max}$, and so a marathon should not be run at a constant speed. Indeed, the researchers reported that a rather good runner (marathon time: 2 hours and 36 minutes) reached 100% of his $\dot{V}O_{2max}$ at a distance of 23.4 miles. The researchers also indicated that the oxygen uptake was between 68% and 100% of $\dot{V}O_{2max}$. For middle-distance running (800-3000 m) specifically, it has been shown that $\dot{V}O_{2max}$ is always achieved ²⁷⁻²⁹.

Our second starting hypothesis was that the physiological strain might be lower in a physiologically controlled time trial. Indeed, we found that the oxygen and cardiac costs ^{13,30} were lower in TT2 and TT3 than in TT1. It has long been known that the oxygen cost of running is a

key factor in endurance performance, along with $\dot{V}O_{2\max}$ and the ability to sustain $\dot{V}O_{2\max}$ at the critical speed or in a peak lactate steady state ^{27,31}.

It is well established that the cardiac cost (the relationship between the HR and running speed, measured here in $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$) changes during high-intensity continuous exercise. At a constant running speed, the HR increases over time. In contrast, maintenance of a constant HR means that the running speed must fall over time ¹³. In real circumstances, athletes generally know the distance of the competition and thus choose the optimal running speed accordingly. They frequently exploit the HR response to regulate their running intensity and optimize their performance; the objective is often to maintain a constant HR ¹³. In a laboratory-based study of the change over time in the HR-speed relationship, Boudet et al. ¹³ simulated races at four different high running speeds (ranging from 82-90% of $v\dot{V}O_{2\max}$, and lasting between 36 and 9 min). By continuously monitoring the HR and the speed, they calculated a novel index: the HR-running speed ratio, i.e. the distance (in m) covered for each beat ¹³. The researchers showed that when the speed was constant, cardiac drift was observed even in short (10-minute) runs at 90% of $v\dot{V}O_{2\max}$, and thus led to a fall in the HR-running speed ratio. By analogy with the oxygen cost (a familiar concept that is reportedly a key factor in long-distance running performance), Boudet et al. ¹³ referred to the HR-running speed ratio as the cardiac cost ³². In a study of a marathon run, the cardiac cost increased throughout the race ³³. In the present study, we observed the same range of cardiac cost values as Boudet et al. did ¹³, although our protocol set the HR to be the speed-controlling variable (i.e. an independent variable, instead of a dependent variable at constant speed). Even though few coaches have access to a portable gas analyzer system, we suggest that HR control might be a means of increasing performance and (perhaps) positive speed asymmetry.

Our study reveals that physiological controllers helped male non-elite runners to improve performance. However, the protocol was designed to enable the runner to achieve the best possible performance. Even though $\dot{V}O_2$ and HR were maintained in a steady state, we could not determine whether or not the runner was in homeostasis ³⁴. We can nevertheless say that the runners were

exhausted at the finish, given that their RPE was 19-20 at the end of TT1, and that the speed decreased (according to Kendall's τ). The best performance was obtained when paced was controlled by $\dot{V}O_2$.

In a constant power paradigm, the changes in pulmonary gas exchanges (and especially $\dot{V}O_2$) during constant-load exercise have been used to define three intensity domains: moderate, heavy, and severe ^{31,35-37}. Next, the $\dot{V}O_2$ steady state (i.e. $\dot{V}O_{2max}$) is used to differentiate between subcritical and supracritical exercise intensities ³⁵. However, our trial design did not follow a constant exercise model, and we were able to obtain a $\dot{V}O_2$ steady state during maximal, freely paced exercise for more than 10 minutes. Our present result confirms an earlier report in which well-trained middle-distance runners were able to maintain a steady state at 93% of $\dot{V}O_{2max}$ during a 12-minute time trial ³⁵.

The constant power model (such as the power eliciting $\dot{V}O_{2max}$ in an incremental protocol) is still useful for predicting middle- and long-distance running performance ³⁸ but cannot provide any information about the speed profile - even though it has been shown that the marathon is run at around the critical speed³⁹. The concept of skewness and the “bathtub-shaped” pace curve may be of value for pacing in the marathon ¹¹. Indeed, Billat et al. ¹¹ recently showed that along with conventional speed variables (the average speed and the coefficient of variation), the asymmetry of the speed distribution (skewness) differentiated between elite and non-elite marathon runners ¹¹. The present study of a 3000 m time trial showed that it was possible to increase performance and come closer to the “bathtub” pace curve by controlling speed with a steady-state physiological variable ($\dot{V}O_2$ or HR). We still do not know how speed variation is integrated into the runner's strategy, and whether it is a controlling variable or dependent variable (or both) - especially when the runner is close to his/her $\dot{V}O_{2max}$.

PRACTICAL APPLICATIONS

Most runners train by monitoring their heart rate and running speed and the runners or their coaches then define training zones with regard to $v\dot{V}O_{2max}$ or HRmax. The steady-state $\dot{V}O_2$ or

HR (at the average value recorded in a freely paced 3000 run) used in this protocol might constitute a relevant tool for producing a training plan suited to the runner's physiological strain. Moreover, a runner performing alone will be able to monitor his/her heart rate (using a monitor) which will allow him to check the correspondence between the perceived intensity and that physiologically control pace.

CONCLUSION

The imposition of a steady-state $\dot{V}O_2$ or HR (at the average value recorded in a freely paced 3000 run) enabled non-elite runners to improve their performance, achieve a more favorable speed distribution, and experience less physiological strain (relative to the freely paced run). This finding may suggest that good but non-elite middle-distance runners do not spontaneously choose the best pace strategy with regard to performance and physiological strain. Controlling speed with a physiological variable was associated with better performance and a lower level of physiological strain.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to thank the study participants for their collaboration, and Jean Pierre Koralsztein, Florent Palacin, and Luc Poinard for helpful advice.

DISCLOSURES

None of the authors have conflicts of interest associated with the present work. Claire Molinari received a CIFRE PhD fellowship, funded by BillaTraining. The work did not receive any significant funding that could have influenced its outcome.

REFERENCES

1. Billat VL, Slawinski J, Danel M, Koralsztein JP. Effect of free versus constant pace on performance and oxygen kinetics in running. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;33(12):2082-2088.
2. Foster C, Snyder AC, Thompson NN, Green MA, Foley M, Schragger M. Effect of pacing strategy on cycle time trial performance. *Med Sci Sports Exerc.* 1993;25(3):383-388.
3. Billat VL, Mille-Hamard L, Meyer Y, Wesfreid E. Detection of changes in the fractal scaling of heart rate and speed in a marathon race. *Phys Stat Mech Its Appl.* 2009;388(18):3798-3808. doi:10.1016/j.physa.2009.05.029
4. Noakes TD. Fatigue is a Brain-Derived Emotion that Regulates the Exercise Behavior to Ensure the Protection of Whole Body Homeostasis. *Front Physiol.* 2012;3:82. doi:10.3389/fphys.2012.00082
5. Esteve-Lanao J, Lucia A, deKoning JJ, Foster C. How Do Humans Control Physiological Strain during Strenuous Endurance Exercise? *PLOS ONE.* 2008;3(8):e2943. doi:10.1371/journal.pone.0002943
6. Coquart JBJ, Dufour Y, Gros Lambert A, Matran R, Garcin M. Relationships Between Psychological Factors, RPE and Time Limit Estimated by Teleoanticipation. *Sport Psychol.* 2012;26(3):359-374. doi:10.1123/tsp.26.3.359
7. Gibson ASC, Noakes TD. Evidence for complex system integration and dynamic neural regulation of skeletal muscle recruitment during exercise in humans. *Br J Sports Med.* 2004;38(6):797-806. doi:10.1136/bjism.2003.009852
8. Ulmer H-V. Concept of an extracellular regulation of muscular metabolic rate during heavy exercise in humans by psychophysiological feedback. *Experientia.* 1996;52(5):416-420. doi:10.1007/BF01919309
9. Noakes TD, Gibson ASC, Lambert EV. From catastrophe to complexity: a novel model of integrative central neural regulation of effort and fatigue during exercise in humans: summary and conclusions. *Br J Sports Med.* 2005;39(2):120-124. doi:10.1136/bjism.2003.010330
10. Fukuba Y, Whipp BJ. A metabolic limit on the ability to make up for lost time in endurance events. *J Appl Physiol.* 1999;87(2):853-861. doi:10.1152/jappl.1999.87.2.853
11. Billat V, Carbillet T, Correa M, Pycke J-R. Detecting the marathon asymmetry with a statistical signature. *Phys Stat Mech Its Appl.* 2019;515:240-247. doi:10.1016/j.physa.2018.09.159
12. Perez-Suarez I, Martin-Rincon M, Gonzalez-Henriquez JJ, et al. Accuracy and Precision of the COSMED K5 Portable Analyser. *Front Physiol.* 2018;9. doi:10.3389/fphys.2018.01764
13. Boudet G, Albuissou E, Bedu M, Chamoux A. Heart Rate Running Speed Relationships During Exhaustive Bouts in the Laboratory. *Can J Appl Physiol.* 2004;29(6):731-742. doi:10.1139/h04-047
14. Cooper KH. A Means of Assessing Maximal Oxygen Intake: Correlation Between Field and Treadmill Testing. *JAMA.* 1968;203(3):201-204. doi:10.1001/jama.1968.03140030033008

15. Katch FI, Pechar GS, McArdle WD, Weltman AL. Relationship between individual differences in a steady pace endurance running performance and maximal oxygen intake. *Res Q.* 1973;44(2):206-215.
16. Marino F e. The limitations of the constant load and self-paced exercise models of exercise physiology. *Comp Exerc Physiol.* 2012;8(1):3-9. doi:10.3920/CEP11012
17. Bath D, Turner LA, Bosch AN, et al. The Effect of a Second Runner on Pacing Strategy and RPE During a Running Time Trial. *Int J Sports Physiol Perform.* 2012;7(1):26-32. doi:10.1123/ijsp.7.1.26
18. Billat VL, Wesfreid E, Kapfer C, Koralsztein JP, Meyer Y. Nonlinear dynamics of heart rate and oxygen uptake in exhaustive 10,000 m runs: influence of constant vs. freely paced. *J Physiol Sci JPS.* 2006;56(1):103-111.
19. Coquart JBJ, Garcin M. Validité et fiabilité des balances basées sur la perception lors de courses épuisantes chez des coureurs masculins entraînés. *Percept Mot Skills.* 2007;104(1):254-266. doi:10.2466/pms.104.1.254-266
20. Foster C, deKoning JJ, Hettinga F, et al. Effect of Competitive Distance on Energy Expenditure During Simulated Competition. *Int J Sports Med.* 2004;25(3):198-204. doi:10.1055/s-2003-45260
21. Townsend MA. Road-racing strategies. *Med Sci Sports Exerc.* 1982;14(3):235-243.
22. Billat V, Demarle A, Paiva M, Koralsztein JP. Effect of training on the physiological factors of performance in elite marathon runners (males and females). *Int J Sports Med.* 2002;23(5):336-341. doi:10.1055/s-2002-33265
23. HANEY TA, MERCER JA. A Description of Variability of Pacing in Marathon Distance Running. *Int J Exerc Sci.* 2011;4(2):133-140.
24. Lambert MI, Dugas JP, Kirkman MC, Mokone GG, Waldeck MR. Changes in Running Speeds in a 100 KM Ultra-Marathon Race. *J Sports Sci Med.* 2004;3(3):167-173.
25. Carbillet T. Monitoring en temps réel de la vitesse de déplacement sur dispositif connecté : modélisation mathématique sur plateforme mobile interfacée avec une base de données d'entraînement et d'audit physiologique. April 2019. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02269138>. Accessed August 27, 2019.
26. Maron MB, Horvath SM, Wilkerson JE, Gliner JA. Oxygen uptake measurements during competitive marathon running. *J Appl Physiol.* 1976;40(5):836-838. doi:10.1152/jappl.1976.40.5.836
27. Duffield R, Dawson B. Energy system contribution in track running. In: ; 2003.
28. Thomas C, Hanon C, Perrey S, Chevalier J-ML, Couturier A, Vandewalle H. Oxygen Uptake Response to an 800-m Running Race. *Int J Sports Med.* 2005;26(4):268-273. doi:10.1055/s-2004-820998
29. Hanon C, Leveque J-M, Thomas C, Vivier L. Pacing Strategy and V·O₂ Kinetics during a 1500-m Race. *Int J Sports Med.* 2008;29(3):206-211. doi:10.1055/s-2007-965109
30. Prampero PE, Francescato MP, Cettolo V. Energetics of muscular exercise at work onset:

- the steady-state approach. *Pflugers Arch.* 2003;445(6):741-746. doi:10.1007/s00424-002-0991-x
31. Jones AM, Burnley M, Black MI, Poole DC, Vanhatalo A. The maximal metabolic steady state: redefining the 'gold standard.' *Physiol Rep.* 2019;7(10):e14098. doi:10.14814/phy2.14098
 32. di Prampero PE. The energy cost of human locomotion on land and in water. *Int J Sports Med.* 1986;7(2):55-72. doi:10.1055/s-2008-1025736
 33. Billat VL, Petot H, Landrain M, Meilland R, Koralsztein JP, Mille-Hamard L. Cardiac Output and Performance during a Marathon Race in Middle-Aged Recreational Runners. *The Scientific World Journal.* doi:10.1100/2012/810859
 34. Ferretti G, Fagoni N, Taboni A, Bruseghini P, Vinetti G. The physiology of submaximal exercise: The steady state concept. *Respir Physiol Neurobiol.* 2017;246:76-85. doi:10.1016/j.resp.2017.08.005
 35. POOLE DC, WARD SA, GARDNER GW, WHIPP BJ. Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. *Ergonomics.* 1988;31(9):1265-1279. doi:10.1080/00140138808966766
 36. Whipp BJ. The slow component of O₂ uptake kinetics during heavy exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 1994;26(11):1319-1326.
 37. Craig JC, Vanhatalo A, Burnley M, Jones AM, Poole DC. Chapter 8 - Critical Power: Possibly the Most Important Fatigue Threshold in Exercise Physiology. In: Zoladz JA, ed. *Muscle and Exercise Physiology.* Academic Press; 2019:159-181. doi:10.1016/B978-0-12-814593-7.00008-6
 38. Jones AM, Whipp BJ. Bioenergetic constraints on tactical decision making in middle distance running. *Br J Sports Med.* 2002;36(2):102-104. doi:10.1136/bjism.36.2.102
 39. Skiba PF, Jones AM. Implications of the critical speed and slow component of Vo₂ for the 2-hour marathon. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. 2011;110(1):280; discussion 294-280; discussion 294. doi:10.1152/jappphysiol.01259.2010
 40. Harber MP, Kaminsky LA, Arena R, et al. Impact of Cardiorespiratory Fitness on All-Cause and Disease-Specific Mortality: Advances Since 2009. *Prog Cardiovasc Dis.* 2017;60(1):11-20. doi:10.1016/j.pcad.2017.03.001
 41. Strasser B, Burtscher M. Survival of the fittest: VO₂max, a key predictor of longevity? *Front Biosci.* 2018;23:1505-1516.

Les résultats de cette étude montrent que les coureurs étaient significativement plus performants lorsqu'on leur imposait leur $\dot{V}O_2$ et leur FC plutôt que lors de leur 3000 m libre. Pour autant, ces impositions de variables physiologiques étaient basées sur les valeurs moyennes de leur 3000m libre, qu'ils pensaient courir de manière optimale.

De fait, quand on remplace le *central gouverneur* par un contrôle physiologique lui imposant d'ajuster la vitesse cela nécessite qu'il faille un biofeedback pour envisager un central gouverneur plus efficace.

De plus, lors de cette troisième étude, en adoptant ce type de contrôle physiologique, le coût cardiaque et le coût en oxygène étaient diminués. Par ailleurs, nous avons mis en évidence que le profil de vitesse se rapprochait du modèle de la répartition des vitesses (Skewness) des coureurs expérimentés.

En fin de compte, dans ces trois études, nous changeons bien de paradigme puisque nous partons du postulat que les coureurs ont la solution en eux, mais nous constatons que ce n'est pas tout à fait le cas puisque lorsqu'on impose une variable physiologique et non une vitesse leur performance s'améliore.

CHAPITRE 3 : DISCUSSION GENERALE

L'objectif général de ce travail de thèse était de contribuer à la compréhension des effets des variables de contrôle que sont notamment le temps (la durée), l'intensité, la distance et les variables physiologiques sur la performance en course à pied.

Autrement dit, nous proposons un nouveau paradigme issu de nouvelles situations expérimentales, dans lesquelles nous avons isolé les facteurs d'influence dans un contexte de performance.

Pour répondre à cet objectif principal, le projet de thèse s'est divisé en trois parties. Dans une première étude nous avons émis les hypothèses suivantes :

- Le test RABIT[®] régulé par la perception, permettrait aux coureurs d'atteindre leur consommation maximale d'oxygène,
- Les coureurs seraient susceptibles de reproduire des réponses physiologiques et de vitesse selon une intensité et une durée fixe.

Une deuxième étude avait pour objectif de déterminer l'énergie à la puissance aérobie la plus élevée soit basée sur $\dot{V}O_{2max}$, sur des performances allant du sprint à la course de fond, lorsque la variable de contrôle est la distance.

La dernière étude consistait à isoler les facteurs physiologiques et la vitesse mesurés sur une performance, pour en faire à leur tour des variables de contrôle de la performance.

1 Le concept de $\dot{V}O_{2max}$ et de plateau à $\dot{V}O_{2max}$

Il y a presque un siècle naissait le concept de consommation maximal d'oxygène ($\dot{V}O_{2max}$) autour duquel se sont construits les facteurs limitants de l'effort. Ce modèle est encore sous-tendu par les protocoles historiques que sont les protocoles à puissances constante comme ceux de Hill et Lupton (1923) qui analysent la consommation d'oxygène en fonction de l'augmentation de la vitesse de course. Les sujets courent plusieurs fois à une vitesse constante différente (protocole dit rectangulaire), cette vitesse est toujours plus haute à chaque essai. Il en résulte que $\dot{V}O_2$ augmentant avec l'intensité de l'exercice, il existe une limite haute de $\dot{V}O_2$.

Ces protocoles à vitesse constante visant à examiner l'évolution de la cinétique de $\dot{V}O_2$ au cours du temps ont permis de découvrir que $\dot{V}O_2$ augmentait jusqu'à atteindre une valeur maximale et non un état stable réel.

En conclusion, quel que soit la vitesse, au-delà de cette limite de $\dot{V}O_{2max}$, il ne peut plus y avoir d'augmentation de l'apport en oxygène. De ce postulat est né le concept de $\dot{V}O_{2max}$. $\dot{V}O_{2max}$ est notamment limité par la capacité du système cardiorespiratoire à transporter l'oxygène vers les muscles. Dès lors, des groupes de recherches se sont focalisés sur l'atteinte de $\dot{V}O_{2max}$ et cette consommation maximale d'oxygène est devenue le pilote des tests d'efforts permettant d'évaluer les capacités cardiovasculaires des athlètes.

Pour comprendre les mécanismes impliqués dans l'atteinte et la limitation de $\dot{V}O_{2max}$, les chercheurs ont réalisés des tests d'effort sur tapis roulant avec une augmentation progressive de la vitesse (protocole dits incrémentés, (62,142)). Comparés au test rectangulaire de Hill et Lupton, les protocoles incrémentés permettaient de courir une fois au lieu de courir de manière répétée à puissance constante (autrement dit, à vitesse constante sur différents protocoles).

Ces tests ont montré que $\dot{V}O_2$ dépend du débit cardiaque et de la différence artérioveineuse de concentration en oxygène. Les tests incrémentés ont alors continué à être développés afin de trouver les protocoles adéquats pour mesurer de façon certaine $\dot{V}O_{2max}$.

Taylor et al., (62) configurent en 1955 un protocole avec des paliers de 3 min à 11,3 km.h⁻¹ ou l'incrément sur tapis roulant correspond à une augmentation de la pente du tapis de 2,5 %. Entre chaque palier, ils imposent au participant un repos de 5 minutes. Lors de ce protocole, ces mêmes auteurs, mesurent en concomitance, la cinétique d'oxygène, la fréquence cardiaque, la ventilation et la cinétique de la lactatémie. Leur protocole s'est avéré adapté pour évaluer l'atteinte de $\dot{V}O_{2max}$ et mesurer les facteurs mis en jeu dans les évaluations cardiorespiratoires.

A des vitesses importantes, malgré l'augmentation de l'intensité de l'exercice, $\dot{V}O_2$ n'augmente plus. Ces auteurs (62) admettent la présence d'un **plateau** de $\dot{V}O_{2max}$, si $\dot{V}O_2$ n'augmente pas de 2,1 mL.kg⁻¹.min⁻¹ malgré l'augmentation de la puissance de l'exercice. La stabilité de $\dot{V}O_2$ atteste donc l'atteinte de $\dot{V}O_{2max}$. Cette mise en évidence du plateau de $\dot{V}O_{2max}$ a ensuite été retrouvée par plusieurs équipes de recherche (135, 242). Si l'existence d'un plateau confirme l'atteinte de $\dot{V}O_{2max}$, une difficulté s'installe lorsque l'existence d'un plateau visible n'est pas détectée chez tous les sujets.

Bassett et Howley (69), affirment que *même dans des conditions de laboratoire soigneusement contrôlées, un pourcentage variable (30% à 95%) de sujets présentera un plateau dans $\dot{V}O_{2max}$ à la fin d'un test d'effort progressif*. Day et al., (77) remarquent que seulement 17% de leur participants en fin de test incrémenté en rampe, obtiennent un plateau de $\dot{V}O_{2max}$. Plus récemment, Gordon et al., (253) lors d'un protocole incrémenté sur ergocycle, obtiennent différents pourcentages de présence d'un plateau à $\dot{V}O_{2max}$. Sur les 10 participants de leur premier

essai, seuls 2 remplissaient le critère principal pour un plateau de $\dot{V}O_2$ à $\dot{V}O_{2max}$. Pour le deuxième essai, le taux de réponse était de 5 sur 10, ce qui a également été répété pour le troisième essai, tandis que pour le quatrième essai, le taux de réponse était de 7 participants sur 10.

L'incidence du plateau de $\dot{V}O_{2max}$ induit la question : A t'on atteint le vrai $\dot{V}O_{2max}$ du sujet même s'il n'y a pas présence du plateau ? L'explication de la prévalence d'un plateau n'est alors pas claire. Pour pallier cela, toujours dans l'optique de prouver la véritable atteinte du $\dot{V}O_{2max}$, les physiologistes de l'exercice ont mis en place des critères secondaires « facilement » mesurables (254).

Trois critères sont admis comme de bons indicateurs de tests maximaux (245, 246):

- Une fréquence cardiaque maximale atteinte égale ou supérieure à 90% de la fréquence cardiaque maximale théorique prédite s'appuyant sur l'âge du sujet
- Un quotient respiratoire QR ($\dot{V}CO_2/\dot{V}O_2$) $\geq 1,15$
- La concentration de lactate sanguin [La] > 8 mM

Malgré ces critères secondaires, le plateau étant toujours le premier critère d'atteinte, les recherches sur les facteurs limitants la présence du plateau s'ensuivent. La prévalence du plateau serait dépendante de la motivation du sujet et liée au niveau physique des sujet (257). Ainsi, les sujets ayant de haute valeur du $\dot{V}O_{2max}$ ont un seuil de douleurs plus élevé et sont capable d'avoir un plateau du $\dot{V}O_{2max}$. A l'inverse, d'autres équipes de recherches affirment que ni la prévalence du plateau du $\dot{V}O_{2max}$ à la fin d'un test incrémenté, ni les variations de $\dot{V}O_2$ autour $\dot{V}O_{2max}$ ne sont significativement différentes entre les personnes entraînées (force, endurance...) ou sédentaires (63, 248, 249). Le niveau ou la motivation du participant n'aurait pas d'influence sur la présence du plateau (63, 248, 249) mais le plateau de $\dot{V}O_{2max}$ serait la conséquence d'un haut métabolisme anaérobie des muscles squelettiques (260). Cette dernière affirmation a été récemment appuyé par Petot et al., (2012), qui ont démontré que c'est la tolérance de la puissance qui permet d'avoir un plateau, encore une fois quel que soit le niveau du sujet (groupes de sujets avec des $\dot{V}O_{2max}$ allant de 43 mL.kg⁻¹.min⁻¹ à 68 mL.kg⁻¹.min⁻¹).

Dans les années 2005 à 2010, l'atteinte des critères secondaires n'est pas toujours en accord avec l'atteinte de $\dot{V}O_{2max}$ et vice versa (56, 72, 249, 251). Quel que soit le critère d'exclusion, on pouvait éliminer des sujets alors qu'ils avaient atteint leur consommation maximale d'oxygène. Malgré les critiques de longue date dirigées contre ces critères, leur utilisation reste répandue. Pour remédier à cela, Midgley et al., (78), instaurent la mise en place systématique de la phase de vérification après un test incrémenté, inventé en 1991(262) mais

plutôt ignorée jusqu'en 2006. Cette phase de vérification peut se réaliser avec un écart temporel plus ou moins long :

- après quelques minutes de récupération, Rossiter et al., (80) demandent à leur sujet de réaliser un all-out à 95% et 105% de la puissance pic de l'incrémenté.

- le jour suivant, les sujets doivent réaliser une puissance constante jusqu'à épuisement (durée 2min et 4min) (81) ou des puissances supra-maximales (105-115% de la puissance pic de l'incrément) (72, 253, 254).

Aujourd'hui l'atteinte de $\dot{V}O_{2max}$ est toujours le concept phare des protocoles d'évaluation des capacités cardio-respiratoires, elle est donc régie par trois conditions, l'atteinte d'un plateau, la validation des critères secondaires et la validation de la phase de vérification.

2 Les facteurs prédisposant à l'apparition de $\dot{V}O_{2max}$ et leur relation avec la performance

2.1 Les seuils lactiques et ventilatoires

Dans le but de lier les évaluations protocolaires des capacités cardio-respiratoires avec la performance, les chercheurs se sont alors intéressés aux facteurs qui prédisposaient à l'apparition d'un plateau de $\dot{V}O_{2max}$.

Les termes de seuils anaérobie et aérobie ont été proposés par Wassermann et son équipe (255, 256) dans les années 1960 pour désigner le moment où le lactate sanguin et la ventilation s'accroissent disproportionnellement par rapport à la consommation d'oxygène. L'apparition d'une acidose métabolique stimule donc une augmentation de la ventilation. En outre, l'utilisation fractionnée de $\dot{V}O_{2max}$ au seuil ventilatoire 2 était un prédicteur satisfaisant de la capacité d'endurance. L'observation d'une relation étroite entre la capacité à maintenir une utilisation fractionnée élevée de $\dot{V}O_{2max}$ sur une période prolongée et l'utilisation fractionnée de $\dot{V}O_{2max}$ au seuil ventilatoire 2 ne permet pas de spéculer sur l'importance du phénomène de rupture dans la courbe de production excessive de CO_2 , lorsque la vitesse de course augmente progressivement. Il indique simplement que, pour des raisons qui sont toujours d'actualité peu clair, les coureurs ayant une grande capacité d'endurance ont tendance à hyperventiler à un pourcentage plus élevé de leur $\dot{V}O_{2max}$ lors d'un test progressif sur tapis roulant. Historiquement il existe deux seuils ventilatoires et lactique comme nous avons pu le décrire dans le 1^{er} chapitre. Chez les sujets sains seul le seuil d'accumulation du lactate et non le seuil d'apparition du lactate, soit le seuil lactique

2, communément appelé le seuil lactique est d'intérêt. D'ailleurs, ce sont les protocoles en rampe (protocole incrémentés suivant une droite linéaire entre la vitesse et le temps) qui s'avèrent adaptés au métabolisme aérobie, et permettent de connaître $\dot{V}O_{2max}$ et le seuil anaérobie (66). Wassermann et McIlroy définissent le seuil anaérobie comme l'intensité d'exercice au-dessus de laquelle, l'apport en oxygène aux muscles est insuffisant par rapport à la demande. De ce fait, la plus petite intensité à partir de laquelle la production de lactate dépasse la capacité d'oxydation musculaire est le seuil d'accumulation d'acide lactique (267). Farrell et al., (1979) définissent le seuil lactique comme la vitesse pour laquelle la lactatémie est supérieure à 1mmol.L^{-1} de la concentration moyenne observée aux vitesses inférieures (111). A vrai dire, le métabolisme anaérobie participe à la production d'énergie bien avant l'atteinte du seuil lactique (258, 259). Certains auteurs utilisent l'évolution de la lactatémie pour déterminer à partir de quelle intensité celle-ci atteint 4mmol.L^{-1} (270). D'autres chercheurs utilisent la rupture de pente dans la courbe représentative de la lactatémie en fonction de l'intensité de l'exercice (vitesse ou puissance) (261, 262). De fait, lors d'un test triangulaire (paliers incrémentés), l'intervention de la capacité anaérobie est mise en évidence par l'augmentation exponentielle de la concentration en acide lactique dans le sang. C'est la vitesse au seuil lactique (273). En résumé, le taux d'apparition du lactate dans le sang dépasse soudainement le taux de disparition et les taux de lactate dans le sang augmentent. La vitesse à laquelle le taux de lactate augmente est donc bien la vitesse au seuil lactique.

L'objectif de performance est donc de faire passer la vitesse au seuil lactique à des vitesses progressivement plus élevées (274). Le seuil a été instauré afin de déterminer à partir de quelle fraction de la $\dot{V}O_{2max}$ le sportif commence à accumuler l'acide lactique. Billat et al., (275) démontrent que le temps limite à $\dot{V}O_{2max}$ est corrélée au seuil lactique en pourcentage de la puissance à $\dot{V}O_{2max}$. Plus le seuil lactique est haut plus le temps de soutien de $\dot{V}O_{2max}$ est long. Il y a donc une implication de la capacité anaérobie dans le maintien de $\dot{V}O_{2max}$ (276). Plus la vitesse au seuil lactique est élevée lors d'un exercice intermittent, plus, lors des phases de repos, les sujets auront le temps de refaire leurs réserves anaérobies mais aussi améliorer la durée de chaque intervalle et le temps de soutien de $\dot{V}O_{2max}$ (72). Joyner et Coyle (277) proposent que l'augmentation très importante de la capacité oxydative musculaire et l'un des principaux facteurs expliquant les hautes valeurs de seuil lactique mesurées chez les athlètes d'endurance de haut-niveau.

Par ailleurs, il existe un lien étroit entre la vitesse de course au seuil de lactate et la perception de la difficulté de l'effort. De ce fait, toute vitesse supérieure au seuil lactique aura tendance à paraître comme difficile et pour les efforts sous ce seuil, les vitesses seront

relativement confortables. Nous comprenons à travers ce développement du seuil lactique que divers auteurs ont suggéré que la vitesse de course au seuil lactique peut parfois être un prédicteur de la performance (278,279). Par exemple Martin et al.,(280) , après avoir entraîné des coureurs de fond d'un niveau olympique, ont constaté que le $\dot{V}O_2$ reste inchangé sur 30 mois d'entraînement tandis que la vitesse de course au seuil lactique a augmenté de 6% en moyenne. Cette amélioration correspondait soit à une amélioration des records personnels, soit à un meilleur classement des coureurs.

Repousser $\dot{V}O_{2max}$, éloigne l'utilisation des contractions musculaires anaérobique et la fatigue qui en découle en permettant de gérer des vitesses d'entraînement et de course de plus en plus élevées en aérobie sans avoir besoin de surproduire de l'énergie anaérobie. De nombreuses études ont rejeté la théorie du $\dot{V}O_{2max}$ comme prédicteur de la performance mais il continue d'être utilisé comme le pivot de nombreux programmes d'entraînement.

2.2 Le coût énergétique

Le coût énergétique et la vitesse au seuil lactique sont liés, puisqu'un coût énergétique minimal signifie un métabolisme glucidique plus faible et donc une production de lactate réduite. La vitesse au seuil lactique dépend de trois facteurs :

- la capacité de dégradation du lactate par le métabolisme oxydatif,
- la capacité de métaboliser le lactate sanguin,
- le coût énergétique.

En effet, le coût énergétique est le ratio entre l'énergie métabolique dépensée et la vitesse de déplacement (cf. Équation 19) (7,281) :

$$\frac{mLO_2 \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}}{m \cdot min^{-1}} \times 100 \quad \text{Eq. 19}$$

Équation 19 : Où, $mLO_2 \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ est l'énergie métabolique dépensée et $m \cdot min^{-1}$ est la vitesse de déplacement et le coût énergétique est exprimé en $mLO_2 \cdot kg^{-1} \cdot m^{-1}$

Le principal critère d'évaluation du cout énergétique est l'atteinte d'un état d'équilibre de $\dot{V}O_2$ (274). La détermination de l'intensité de travail impose donc de contrôler la validité de la mesure de $\dot{V}O_2$ et limite la mesure du coût énergétique à des exercices dont l'intensité est liée

à l'utilisation d'énergie uniquement aérobie. Les coureurs avec un bonne économie de cours utilisent moins d'oxygène pour courir à une même vitesse spécifique.

Etant donnée qu'il existe une grande variabilité inter-individuelle du cout énergétique entre des coureurs montrant des mêmes valeurs de $\dot{V}O_{2max}$ (89), le coût énergétique de la course est parfois plus prédictif du niveau de performance chez les sportifs de haut niveau que le $\dot{V}O_{2max}$ (91,101).

En effet, un coureur avec un bon coût énergétique aura tendance à travailler à des pourcentages plus bas de $\dot{V}O_{2max}$ pour différentes vitesses, qu'un coureur qui a besoin de plus d'oxygène (mauvais coût énergétique). Par conséquent cela prolonge l'endurance de course. De fait, un bon rendement énergétique est profitable à la performance lors des épreuves de longues durées (261,282,283). Le coût énergétique est un bon prédicteur de la capacité à réaliser une distance de course (101). Elle peut parfois explique près de 2/3 de la variation des performances sur 10 kilomètres chez des coureurs très entraînés (86).

De même, que les protocoles sont sous-tendus par les concepts de $\dot{V}O_{2max}$ et ses facteurs limitants, la modélisation des performances sportives s'appuie sur de nouveaux outils de description de la dynamique physiologique des sportifs de haut niveau. Ces performances ont été fondées sur le poids de l'évolution des performances passées sans changer de paradigme. La modélisation de la performance peut se faire à partir de $\dot{V}O_{2max}$, la fraction de $\dot{V}O_{2max}$ pouvant être soutenue lors d'une épreuve (F) et le coût énergétique de la course.

$$\text{Vitesse de course} = F \times \dot{V}O_{2max} / \text{Coût énergétique} \quad \text{Eq. 20}$$

Équation 20 : Où, la vitesse de course est estimée par l'équation en $m \cdot \min^{-1}$, F est la fraction de $\dot{V}O_{2max}$ en pourcentage pouvant être soutenue lors de l'épreuve et le coût énergétique s'exprime en $mLO_2 \cdot kg^{-1} \cdot m^{-1}$.

La performance peut donc être augmentée en augmentant $\dot{V}O_{2max}$ et/ou la fraction de $\dot{V}O_{2max}$ et en diminuant le cout énergétique. Une des meilleures descriptions de la manière dont $\dot{V}O_{2max}$ et l'EC interagissent pour influencer sur la vitesse de course a été fournie par Daniels (89) dans sa description et définition principes de la « vitesse à $\dot{V}O_{2max}$ » ($v\dot{V}O_{2max}$).

Le rapport entre $\dot{V}O_{2max}$ et le coût énergétique est à l'origine du concept de vitesse à $\dot{V}O_{2max}$. La détermination de cette vitesse est réalisée soit à partir de paramètres physiologiques ($\dot{V}O_{2max}$ et le cout énergétique), soit en mesurant l'allure de course la plus élevée atteinte lors d'une épreuve à vitesse progressivement augmentée poursuivie jusqu'à l'épuisement. La vitesse

à $\dot{V}O_{2max}$ permet d'établir un lien direct entre l'évaluation de la performance et la détermination des allures de course pour l'entraînement, ce qui n'est pas le cas pour le $\dot{V}O_{2max}$ et le coût énergétique. Le concept de vitesse à $\dot{V}O_{2max}$ illustre bien le transfert de connaissance entre la recherche et ses applications. Sur le terrain, la vitesse à $\dot{V}O_{2max}$ peut être mesurée directement en retenant la vitesse obtenue à l'arrêt d'un test par paliers d'intensité croissante jusqu'à ce que le sujet n'arrive plus à maintenir l'allure de course imposée. L'intérêt principal d'une telle épreuve est d'imposer les allures de course à l'aide de repères sonores (99) ou à l'aide d'un cycliste que le sujet doit suivre pour maintenir une allure donnée (284). L'habileté des sujets à contrôler leur allure, comme facteur influençant la performance, est alors minimisée. Léger et Boucher (99) sont les premiers auteurs à avoir proposé un test de course indirect, par paliers incrémentés, initialement utilisé pour évaluer le $\dot{V}O_{2max}$ des sujets : le test de course sur piste de l'Université de Montréal (UMTT). Les auteurs retiennent comme performance la vitesse au dernier palier de course entièrement couru. Au moyen de ce test, la détermination du $\dot{V}O_{2max}$ est réalisée en attribuant au sujet le coût énergétique moyen de la vitesse de course au dernier palier entièrement couru. Léger et Boucher, (99) affirment que le test est reproductible, indépendamment du sexe et du niveau de performance.

3 Facteurs d'influence, les contributions énergétiques aérobie et anaérobie

Historiquement le système aérobie est décrit comme étant lent pour répondre aux demandes de l'exercice maximal, et par conséquent, ayant très peu d'implications dans l'exercice maximal de courte durée (1 à 2 min). Avec l'utilisation des analyseurs de gaz cycle à cycle une réponse plus rapide du système d'énergie aérobie et par conséquent une contribution relative plus élevée de l'apport de l'énergie aérobie dans l'exercice maximal de courte durée < 2 min est maintenant acceptée.

La méthodologie de la dette d'oxygène a permis de déterminer qu'un effort de 10 secondes équivalait à une part de 85% anaérobie et 15% aérobie, 2 minutes permettait une contribution égale aérobie/anaérobie et enfin, 120 minutes équivalait à 1% anaérobie et 99% aérobie (285). Mathews et Fox (286) définissent alors un continuum énergétique pour les courses sur piste, c'est-à-dire rôle croissant du métabolisme aérobie à mesure que la distance de l'épreuve augmente.

Finalement, la contribution du système énergétique lors d'un effort maximal a été réévaluée en 1989, par l'utilisation de la méthode du déficit en oxygène accumulé (AOD) pour

mesurer l'apport d'énergie anaérobie (171). Pour des 1500m réalisés en 3 minutes et 45 secondes il y aurait une répartition égale aérobie/anaérobie, pour un 2 Miles réalisé en 9 min contribution presque égale 45% anaérobie et 55% aérobie. La part du système aérobie est très large, elle part de pratiquement zéro pourcent de contribution sur un 100m à 80% sur un 10,000m (165). Contrairement à cette étude, Tokmakidis et al., (287) admettent que le système d'énergie aérobie contribue à un apport d'énergie plus élevée qu'on ne le pensait auparavant, soulignant des épreuves d'une durée de 10 secondes et 20 secondes dont la contribution aérobie est respectivement de 13 et 19%. Les recherches antérieures aux années 2000 sur tapis roulant surestimaient donc la contribution anaérobie ou sous-estimaient la vitesse à laquelle le système énergétique aérobie fournit de l'énergie pendant un exercice plus court et maximal (174). De fait, en 2001, il fut admis qu'une contribution énergétique autant aérobie qu'anaérobie se produisait au bout de 75 secondes d'exercice à une intensité maximale.

La plupart de ces études se sont centrées sur la contribution respective des métabolismes aérobie et anaérobie sur tapis roulant à puissance constante. Les études de l'équipe de recherche de Hanon (153,192,288) ont permis de mettre en évidence que les données apportées par une évaluation directe de la dépense énergétique en situation de performance s'avéraient contradictoires avec les résultats obtenus sur tapis roulant (à vitesse constante). En effet, Spencer et Gastin (173), ainsi que Draper et al., (179, 279) ont conclu au fait qu'au cours de 800 ou 1500 mètres réalisés sur tapis roulant le $\dot{V}O_{2max}$ n'était pas atteint. Alors que, des études (146, 197) réalisés sur le terrain selon un profil de répartition d'effort similaire à la compétition, montrent le contraire. De fait, sur piste après un départ plus rapide que la vitesse moyenne de la course, les athlètes atteignent respectivement leur $\dot{V}O_{2max}$ en moyenne après 45 secondes sur 800 m et 56 secondes 1500 m.

Quant à Billat et al., (204), leurs travaux montrent que lors de courses de moyenne distance sur 800 m et 1 500 m, les variations de vitesses pendant les premiers 70% du temps de la course servent à maintenir constant le temps jusqu'à l'épuisement à la puissance anaérobie. Cette observation est conforme à l'hypothèse selon laquelle, à tout instant, la vitesse est contrôlée par la réserve anaérobie dominante.

4 Facteurs d'influence, la vitesse associée à $\dot{V}O_{2max}$ et la vitesse critique

Comme nous l'avons mis en évidence, l'association entre $\dot{V}O_{2max}$ et les temps de course en compétition n'est plus actuelle. Un athlète qui améliore $\dot{V}O_{2max}$ de $60 \text{ mL.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ à $66 \text{ mL.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ peut généralement être assurée d'une amélioration d'environ 10% de sa performance. Mais, un coureur avec un $\dot{V}O_{2max}$ de $66 \text{ mL.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ n'est pas assuré qu'il sera meilleur qu'un concurrent avec un $\dot{V}O_{2max}$ de $60 \text{ mL.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$.

La vitesse associée à $\dot{V}O_{2max}$ ($v\dot{V}O_{2max}$) reflète le taux maximal de la consommation d'oxygène mais elle intègre également le coût énergétique. De ce fait, $v\dot{V}O_{2max}$ est un bien meilleur prédicteur de la performance que $\dot{V}O_2$ (85, 279, 280). La détermination de la $v\dot{V}O_{2max}$ peut se faire en laboratoire sur tapis roulant mais cela détériore le coût énergétique. Un mauvais coût énergétique signifierait notamment que le $\dot{V}O_2$ serait atteint rapidement à des vitesses relativement faibles. Des alternatives aux protocoles de laboratoire sont les tests de terrain comme le test de terrain de 6min, de 12min, ou encore l'UMTT et le VAMEVAL, qui permettent tous d'évaluer $v\dot{V}O_{2max}$.

La vitesse à $\dot{V}O_{2max}$ ($v\dot{V}O_{2max}$) a été utilisée pour déterminer le temps restant en effort maximal jusqu'à l'épuisement volontaire (Tlim) (54). Il s'agit d'un paramètre corrélé à la performance en course longue distance, comme les courses de 1500 à 5000 mètres, 10 kilomètres et 21 kilomètres (48, 49). La vitesse à $v\dot{V}O_{2max}$ et le Tlim ont tous deux été utilisés pour indiquer respectivement, la puissance aérobie et la capacité anaérobie afin de prescrire individuellement la durée, l'intensité de la séance d'intervalle training, ainsi que la performance des athlètes (57).

Puisqu'il y a un temps limite à produire un effort à une vitesse donnée, il devrait y avoir une puissance que l'on peut considérer pour repousser ce temps limite vers l'infini. Cette puissance (vitesse) sera dénommée « critique » (23) car elle correspondrait alors à « l'asymptote » de la courbe vitesse en fonction du temps (cf. Figure 17) (25, 281).

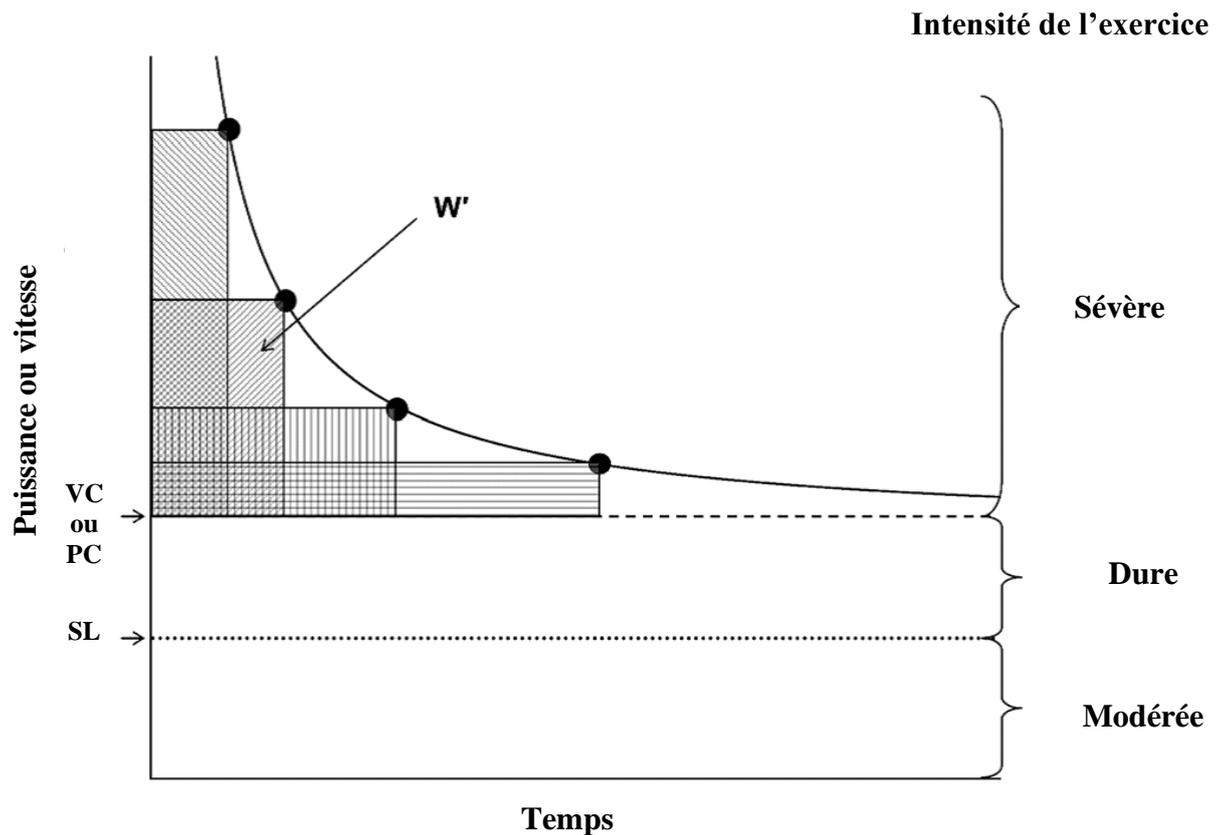


Figure 17 : Relation puissance (vitesse)-temps (P(V)-t) pour les exercices de haute intensité. Notez que bien qu'il soit devenu habituel d'illustrer le modèle non linéaire à l'aide d'axes inversés, le temps reste la variable dépendante. SL est le seuil lactique, PC et VC sont la puissance ou la vitesse critique.

La puissance critique est la plus haute puissance (vitesse) durant laquelle le métabolisme aérobie fournit de l'énergie. Lorsque le coureur est au-dessus de cette puissance critique d'ordre de 5 à 10% (26,31) on note l'intervention du métabolisme anaérobie. En d'autres termes, la vitesse critique correspond à la vitesse constante permettant de maintenir le plus longtemps possible $\dot{V}O_{2max}$ (133). La vitesse critique est à environ 88% de $v\dot{V}O_{2max}$ selon Morton et al., (292).

De même, Zoladz et al., (27) ont démontré que la relation $\dot{V}O_2$ - vitesse dans cette zone de delta puissance (entre la vitesse critique et la vitesse maximale aérobie, VMA) n'était plus linéaire. En effet ils montrent que $\dot{V}O_2$ augmente de façon exponentielle entre la vitesse critique et VMA. Cette augmentation est interprétée comme étant le résultat de la « fatigue » musculaire (soit l'impossibilité de maintenir une puissance constante). A la suite de cette étude, Zoladz et

al., (293) ont également trouvé que le point de changement de l'évolution de la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) lors d'un protocole incrémenté était très similaire au seuil lactique.

Pour conclure, après le dépassement de la vitesse critique, l'intervention du métabolisme anaérobie est nécessaire pour fournir de l'énergie. La puissance critique est donc la « limite basse » des exercices dont l'intensité est considérée comme sévère, provoquant obligatoirement une dérive de $\dot{V}O_2$ vers sa valeur maximale lorsque la puissance est constante (26,33).

Par ailleurs, lors des protocoles à puissance constante, plus la puissance est élevée plus le temps pour atteindre $\dot{V}O_{2max}$ est court (294) mais aussi le temps de maintien à $\dot{V}O_{2max}$ ($T_{lim@ \dot{V}O_{2max}}$) est court (105). L'augmentation suivie de la baisse immédiate de la puissance provoque un plateau de $\dot{V}O_2$, alors que l'augmentation suivie d'un plateau de puissance puis d'une baisse de puissance provoque une augmentation de $\dot{V}O_2$ (295). L'ajustement de la cinétique de $\dot{V}O_2$ est donc plus lent lors d'exercices à hautes intensités.

En outre, lors de protocoles intermittents, on observe une augmentation du temps limite à $\dot{V}O_{2max}$ (126, 127, 286). Midgley et Mc Naughton (135) recommande alors pour un protocole intermittent avec un haut soutien de $\dot{V}O_{2max}$ des vitesses de 90 à 105% $v\dot{V}O_{2max}$ pour des intervalles de 30 secondes - 30 secondes ou 15 secondes – 15 secondes sans interruption entre l'échauffement et le protocole. En résumé, le temps de soutien à $v\dot{V}O_{2max}$ de $\dot{V}O_{2max}$ est entre 6 et 10 minutes pour des puissances constantes et jusqu'à 14 min pour des exercices intermittents.

Par ailleurs, Petot et al., (33) affirment que $\dot{V}O_{2max}$ et le temps limite à $\dot{V}O_{2max}$ ne sont pas corrélés. A cet égard, le temps de maintien de $\dot{V}O_{2max}$ que ce soit sur un test de temps limite à puissance constante ou à la fin d'un test incrémenté est dépendant de la variation de puissance quel que soit le $\dot{V}O_{2max}$ des sujets.

Un autre résultat fort intéressant lors du protocole avec décréments de Billat et al., (60) est que la puissance moyenne est significativement plus faible que la puissance associée à $\dot{V}O_{2max}$ lors d'un protocole avec des paliers incrémentés. Ce qui est en accord avec les observations de nombreuses équipes de recherche, où, plus la puissance était baissée rapidement et de nombreuses fois, plus le $t_{lim@ \dot{V}O_{2max}}$ était long. Ceci est dû au délai de l'ajustement de la cinétique d'oxygène à de hautes puissances (46, 74, 241, 287, 288) car plus la cinétique est longue plus $\dot{V}O_2$ sera maintenu avec des puissances faibles, cela repousse l'arrêt prématuré des tests. Certes, cela ne fournit pour l'instant aucun modèle de variation de puissance plus efficace

à reproduire. Mais, pour conclure une puissance constante excessive devient alors un des facteurs limitants du maintien de $\dot{V}O_{2\max}$ (33).

5 La centralisation des facteurs d'influence, *le gouverneur central*

Le gouverneur central est considéré comme un centre capable de fournir des boucles de régulation lors d'effort à hautes intensités afin de conserver l'homéostasie et de préserver les organes vitaux comme le cerveau, le cœur ou les muscles squelettiques (215). Selon ce modèle, les modifications physiologiques des systèmes périphériques sont autant de signaux, modulant l'intensité d'exercice par le contrôle du système nerveux central de façon dynamique et intégrative (185, 200). Le niveau de sollicitation métabolique, la quantité de réserves énergétiques, le niveau d'accumulation de chaleur, parmi d'autres nombreuses variables, seraient intégrées et prises en considération de façon non consciente afin d'ajuster continuellement l'intensité d'exercice (299). Le cerveau contrôlerait l'intensité d'exercice à partir d'un algorithme décisionnel prenant en compte l'estimation de la durée d'effort restant et les conditions environnementales et physiologiques pour fixer une stratégie spécifiquement adaptée à la nature de l'exercice (203). Le flux d'informations afférentes rendant possible cette régulation se produit durant la totalité de l'exercice, permettant un ajustement en fonction de l'évolution des conditions (203). La fatigue est donc envisagée non pas comme un simple événement physiologique mais également comme une sensation (300) dont l'utilité est de protéger l'organisme, empêchant au sportif de produire un effort trop dangereux.

Cette nouvelle ère sur la perception de l'effort régulant les efforts et les performances des coureurs n'est pas si inédite, puisque lors des protocoles incrémentés il était demandé aux participants d'évaluer leur effort perçu, seulement c'était une variable mesurée et non imposée aux coureurs. Bien évidemment depuis une dizaine d'année, elle fait partie des recommandations de l'ACSM pour la prescription d'exercice. Mais, ce n'est qu'en 2012, que l'échelle de la perception de l'effort devient la variable indépendante du protocole sur tapis roulant (230), et qu'en 2016, par une seule étude (238) qu'elle est appliquée et démontrée comme valide sur le terrain.

6 Un nouveau paradigme autour de ces facteurs d'influence de réponses physiologiques dans un contexte de performance

Après presque 100 ans de recherches autour de la consommation d'oxygène, les résultats sur les déterminants de $\dot{V}O_{2max}$ appuient le point de vue de Hill. Nonobstant, comme nous venons d'en discuter, il demeure une importance relative à chacun des déterminants de $\dot{V}O_{2max}$. En effet, les limites de $\dot{V}O_{2max}$ ne changent pas, bien que les tests d'efforts soient régulés par la perception. Autrement dit, on retrouve les valeurs maximales couramment employées et développées dans le chapitre 1 (fréquence cardiaque, quotient respiratoire...) pour déterminer l'atteinte d'une capacité maximale aérobie.

Dans notre travail de thèse, il était important non seulement de démontrer qu'un " vrai " $\dot{V}O_{2max}$ avait été atteint au cours du protocole RABIT[®], mais aussi que des critères rigoureux étaient en place pour s'assurer que tel était le cas et que la consommation maximale d'oxygène avait été soigneusement examinée. Nolan et al., (2014) ont constaté qu'une phase de vérification à 105% de la vitesse maximale du test incrémenté confirmait une valeur réelle de $\dot{V}O_{2max}$ pour tous les participants, quel que soit le temps de récupération entre le test incrémenté et le test de vérification (301). Tandis qu'une vitesse de 115% confirmait uniquement $\dot{V}O_{2max}$ pour huit participants sur douze.

Les résultats de notre étude sont en accord avec ces auteurs puisque, dans notre test RABIT[®] la vitesse maximale est à ~110% de l'UMTT. Cependant lorsque dans la phase de vérification elle est à 115% de la vitesse maximale du test RABIT[®], le $\dot{V}O_{2max}$ est significativement plus bas que dans l'UMTT. Cela corrobore, ainsi avec l'idée de Poole et Jones (302), selon laquelle, il est possible que lors des tests d'efforts à 115%, l'intensité limite la capacité des participants à produire une performance maximale pendant une période suffisamment longue pour que la cinétique de $\dot{V}O_2$ réponde en conséquence. Bien que notre test de $\dot{V}O_{2max}$ (RABIT[®]), contrôlé par la perception de l'effort soit novateur, d'une part, par ses durées limitées en accord avec les différentes intensités de perception et d'autre part, par son exercice réalisé sur le terrain, nos coureurs n'ont pas eu besoin d'apprentissage. Puisque, comme

l'avait recommandé Garcin et al., (221) l'estimation du temps limite et la perception de l'effort augmente linéairement avec le pourcentage de temps limite.

Nos athlètes ont été capables de reproduire des réponses physiologiques et de vitesses lors d'une intensité donnée répartis sur un temps limite. Sans compter que les coureurs connaissent donc leur temps limite, le gouverneur central a donc tout son rôle à jouer (208).

Dans cette optique, Foster et al., (303) ont mis en évidence que la façon dont un sujet stabilise une stratégie de course pour une épreuve donnée est reliée à l'augmentation de sa confiance dans le fait qu'il pourra achever l'épreuve sans que des degrés irraisonnables de difficulté d'effort perçue ne soient atteints. Ainsi, les stratégies d'allure peuvent être considérées comme un processus complexe au sein duquel le sujet gère l'intensité d'exercice à chaque instant en prenant en considération l'état des ressources physiologiques et psychologiques qu'il possède encore et la durée d'exercice restante, s'il maintient la même intensité jusqu'à la fin de l'épreuve (220). En effet, dans notre étude 1, même lorsque l'on distingue le temps total d'un palier en trois temps relatifs, les coureurs présentent le même comportement physiologique et de vitesse au cours du temps. Nos paliers diffèrent en durée, afin justement, de prendre en compte l'effet du temps sur la réponse de $\dot{V}O_2$. Les sujets ont maintenu une vitesse stable dans les paliers sous-maximaux (RPE 11 et 14) tout en augmentant leurs réponses cardiorespiratoires au cours du temps.

Précédemment, il avait été démontré que $\dot{V}O_{2max}$ mesuré par un test de perception sur le terrain était comparable à un test de perception en laboratoire (238). Cependant, ces expériences ont encore nécessité des analyseurs de gaz portables coûteux. Il s'agissait alors de déterminer si le test de terrain à la perception et ses variables offraient de fortes qualités prédictives de $\dot{V}O_{2max}$, à un niveau similaire aux protocoles établis tels que le test sur piste de l'Université de Montréal et le test de la navette de 20 m. L'étude 1 a permis de répondre à cette question. Les athlètes étaient capables de reproduire les réponses physiologiques à des intensités sous-maximales et maximales en utilisant une montre et un cardio GPS sur le terrain.

Le test RABIT[®] est donc un protocole valide pour l'évaluation des paramètres de la condition cardiorespiratoire, tels que le $\dot{V}O_{2max}$. Bien qu'il n'ait pas été démontré qu'il soit un protocole supérieur au GXT, on peut néanmoins en conclure qu'il s'agit d'une alternative intéressante au GXT, selon les besoins spécifiques des athlètes et des entraîneurs.

Le test RABIT[®] en revanche offre une conception plus efficace en ce qui concerne la perception des intensités et la reproductibilité de celles-ci tout en offrant à peu près les mêmes informations que le GXT.

Toutefois, dans cette première étude, il y a un aspect bien plus discutable, puisque nous demandions à nos coureurs une intensité maximale pouvant révéler $\dot{V}O_{2max}$ à un RPE égale à 17. Effectivement un RPE égale à 17 est préférablement considéré comme du sous-maximal puisque dans la 10^{ème} édition de l'ACSM, $RPE \leq 17$ est considéré comme une intensité haute et non maximale (Tableau 3). Aujourd'hui, l'intensité perçue comme maximale est ≥ 18 , au vu de recherches actuelles, les équipes de recherche s'accordent même sur un RPE de 20 (224, 229, 294–296).

Intensité	%FCmax	% $\dot{V}O_{2max}$	RPE
Basse	≤ 63	≤ 45	≤ 11
Moyenne	≤ 76	≤ 63	≤ 13
Haute	≤ 95	≤ 90	≤ 17
Maximale	≥ 96	≥ 91	≥ 18

Tableau 3 : Tableau traduit de l'American College of sports Medicine (2018).

Pourtant, dans notre démarche, lorsque l'on compare les pourcentages d'intensités dits « maximaux » de FCmax et $\dot{V}O_{2max}$, prescrits par l'ACSM (2018), à nos résultats, ils correspondent à des intensités maximales. En effet, nos coureurs sont en moyenne à 92% de leur $\dot{V}O_{2max}$ sur les 3 minutes à un RPE de 17 et à 96% de leur FCmax.

Les différences de résultats entre les études peuvent-être expliquées par des dissimilitudes de protocole.

Dans les travaux de Chidnok et al., (307) le dernier palier du test de $\dot{V}O_{2max}$ à la perception de l'effort a été fixée à un RPE de 20. En conséquence, leurs participants ont été informés qu'ils devaient "se positionner à l'intérieur de chaque palier conformément au RPE prescrit, produire un effort maximal pendant le dernier palier et atteindre l'épuisement volontaire à la fin de l'épreuve". D'autres auteurs ont ensuite, lors du dernier palier (RPE 20), de leur test autorégulé (SPV) demandé à leurs sujets : *To perform a maximal effort (i.e., an all-out sprint) with no regard for pacing themselves over the 2 min* (231). Soit, de faire un sprint sans se soucier de leur allure sur les 2 minutes. On peut en conclure que ce n'est pas vraiment une démarche « libre » de régulation de l'effort comme sur leur palier précédent.

Dans cette démarche, leur protocole était moins penché sur l'aspect « d'autogestion » de l'allure que sur l'inclusion d'un « sprint all-out ». Ce sont deux concepts différents puisque la

consigne « all-out » est contraire à « l'autogestion ». De fait, en s'attendant à ce que tous les participants interprètent un RPE de 20 comme une stratégie « all-out », le contrôle subjectif de l'effort est supprimé de la conception de l'exercice. Ceci est en contradiction avec l'hypothèse selon laquelle l'auto-gestion de l'allure permet en soi d'obtenir un $\dot{V}O_{2max}$ (308).

En ce qui nous concerne, nous avons observé que la liberté du coureur, sachant que son effort devait être « Dur », a été de choisir ce type d'effort all-out pour accomplir le « dur » en 3 minutes. Ce qui est instinctivement, en accord avec la littérature, qui démontre qu'un effort all-out de 3 minute augmenterait rapidement la cinétique de l'oxygène jusqu'à son maximum. Effectivement, si l'on compare la vitesse moyenne de notre palier à un RPE de 17 et la vitesse moyenne du dernier palier de l'UMTT, nos athlètes courent en moyenne moins rapidement. Alors que c'est à ce moment que les deux tests permettent une atteinte de $\dot{V}O_{2max}$ sans différences significatives de ces valeurs. Cela s'explique entre autres, par le fait que lors du test RABIT[®], les sujets ont un départ rapide, puis diminuent leur vitesse pour enfin la stabiliser. D'autant plus, qu'il y a une différence significative entre la vitesse à 1 minute de course et la vitesse à 2 minutes de course et, qu'il n'y en a pas entre la vitesse à la deuxième minute et celle à la 3^{ème} minute.

Cette atteinte de $\dot{V}O_{2max}$, en dépit du fait que la vitesse diminue serait due au délai de l'ajustement de la cinétique du $\dot{V}O_2$ à de haute puissance (309). L'adaptation lente du $\dot{V}O_2$ permet de soutenir $\dot{V}O_{2max}$ plus longtemps avec des puissances plus faibles (46, 54, 55, 74, 241, 287, 288) et ainsi repousse l'arrêt prématuré de l'exercice. En conclusion, les baisses rapides de puissance durant le plateau du $\dot{V}O_{2max}$ permettent de maintenir $\dot{V}O_2$ à sa valeur maximale (33,60). Ainsi, cette stratégie de course à un RPE égale à 17, est physiologiquement en accord avec l'ajustement de la cinétique d'oxygène. D'autre part, elle concorde avec la stratégie d'allure de l'étude de Mauger et Sculthorpe (230), car leurs sujets optent pour le même comportement de la vitesse associée à $\dot{V}O_{2max}$ même si leur dernier palier est à un RPE égale à 20. Par ailleurs, cette stratégie de départ rapide identifiée lors de notre étude 1, se trouve être également la stratégie qu'adoptent les coureurs spécialistes du 800 et 1500 m (153,205).

A travers notre seconde étude, nous avons souhaité comprendre les exigences métaboliques de la course à pied lors de course réelle sur le terrain. Pour cela, nous avons déterminé par une approche classique et conforme aux données de la littérature, les contributions relatives des systèmes d'énergie aérobie et anaérobie. Nos résultats sur la contribution relative aérobie lors des 1500m et 3000m étaient de $81 \pm 5,8 \%$ et $82 \pm 2,8 \%$, sont concordants avec les études de Duffield et al., (175,176,184). Par contre, nous avons évalué de plus grandes parts aérobies pour les 100m 200m et 800m que dans la littérature lors de courses réelles.

En résumé des travaux effectués précédemment lorsque la variable de contrôle est la distance (chapitre 1, partie 3.2), comme dans notre deuxième étude, les travaux ont estimé les parts aérobie et anaérobie du métabolisme, puisqu'ils analysent que ce sont des facteurs limitants la performance. Cependant, à notre connaissance, nous sommes la première équipe à avoir évalué la production d'énergie à la puissance aérobie la plus élevée ($\dot{V}O_{2max}$).

Toutefois, Billat et al., (133) ont utilisé un test d'exercice gradué (GXT) pour déterminer le $\dot{V}O_{2max}$ du sujet et la vitesse à laquelle il l'atteint. Ensuite, ils ont demandé aux participants de courir jusqu'à l'épuisement à 90%, 100%, 120% et 140% de la vitesse associée à $\dot{V}O_{2max}$ dans un GXT, et ont déterminé les temps de parcours et distances correspondants. Comme ils avaient mesuré la consommation d'oxygène toutes les 15 secondes, ils ont également pu déterminer les distances et les temps de course lorsque les participants couraient réellement à $\dot{V}O_{2max}$. Enfin, ils ont analysé les données en traçant la distance totale parcourue en fonction du temps total jusqu'à l'épuisement, et la distance par rapport au temps à $\dot{V}O_{2max}$. Cependant, cette approche portait sur une vitesse constante (par rapport à la vitesse de course associée à la consommation maximale d'oxygène de l'athlète, soit $v\dot{V}O_{2max}$) il pourrait donc s'agir d'un artefact de protocole incrémenté, qui correspond au rapport entre $\dot{V}O_{2max}$ et le coût énergétique de la course (133).

Il est clairement établi que, durant un effort long et intense (en compétition ou à l'entraînement) la vitesse n'est pas linéaire tout au long de la course et oscille de manière irrégulière en fonction du temps de la course (142, 152). Dans ce cas, les protocoles de laboratoires mis en place pour mesurer $\dot{V}O_{2max}$ et son maintien durant lesquelles la vitesse ne varie pas (protocole rectangulaire), peu (protocole incrémenté), ou de manière très régulière (protocole intermittent) deviennent inadéquats pour expliquer les mécanismes impliqués dans la performance sportive. Selon le modèle de la puissance critique, nous savons que la vitesse de course est contrôlée par les réserves anaérobies restantes (204). D'ailleurs dans les sprints cette part anaérobie est considérée par la plupart des physiologistes comme quasiment unique.

Lors de notre étude 2, nous avons pu mettre évidence que toutes distances confondues, 89% de nos 78 coureurs étudiés, ont atteint $\dot{V}O_{2max}$ lors de leur course. D'ailleurs, dix de nos treize coureurs sur 100m ont atteint $\dot{V}O_{2max}$ pendant quelques secondes. Ainsi, une partie de nos résultats concorde avec la littérature (146, 197), où tous leurs coureurs de 800m et 1500m ont atteint $\dot{V}O_{2max}$, puisque nos huit coureurs de 800m et 15 de nos 16 coureurs de 1500 m ont atteint $\dot{V}O_{2max}$. En effet, une autre équipe de recherche a montré qu'il est également possible que les

coureurs atteignent et soutiennent $\dot{V}O_{2max}$ sur des courses comme le 10 km (310), ce que confirment tous nos coureurs de 10 km également.

Dans cette perspective d'atteinte de $\dot{V}O_{2max}$ lors de courses réelles, nous avons établi que l'énergie ($E@ \dot{V}O_{2max}$) à la puissance aérobie la plus élevée ($\dot{V}O_{2max}$) en pourcentage de l'énergie aérobie totale n'était pas significativement différente entre les sprints, le 800m et le 10 km, ainsi qu'entre le 1500 m et le 3000 m. Cette $E@ \dot{V}O_{2max}$ pourrait être un continuum énergétique entre les distances du 100m au 10 km, quasiment de la même manière que Mathews et Fox en 1971, établissent un continuum énergétique pour les courses sur piste (286).

Enfin dans notre démarche, lors des courses libres (études 1 et 2), il y avait une constante adaptation de la part des coureurs pour ne pas épuiser les réserves énergétiques mais les utiliser à bon escient. Cela, afin de ne pas atteindre les niveaux critiques de perturbations homéostasiques (200, 207, 301). Dans cette perspective, si les variations d'intensité survenant lors de l'exercice permettent de prévenir la survenue de perturbations critiques de l'homéostasie avant la fin de l'exercice, alors connaître la durée de l'exercice permettrait une régulation de la vitesse (ou de la puissance) tout au long de l'épreuve (312,313). Même si, à ce jour, les recherches sont en accord sur le fait que la stratégie de vitesse constante donnerait un temps global beaucoup plus lent, nous ne connaissons toujours pas le mécanisme de contrôle de cette vitesse selon les sensations des athlètes. Effectivement, les processus qui définissent la perception de l'effort au cours d'un exercice restent encore largement méconnus. Toutefois, il est admis qu'il existe un système d'interprétation des rétroactions afférentes qui reconnaît l'intensité d'exercice à un niveau subconscient et que son interprétation détermine la perception de l'effort (314). La pénibilité d'effort perçue est admise comme associée à la fréquence cardiaque (315), à la consommation d'oxygène, à la fréquence respiratoire et à la ventilation pulmonaire (\dot{V}_E) (316). De plus, plusieurs équipes affirment que les facteurs de performance qui sont probablement détectés inconsciemment comprennent le degré d'oxygénation artérielle (317) ou cérébrale (318,319), ce qui pourrait corroborer notre hypothèse selon laquelle le *gouverneur central* intègre la quantité d'oxygène que l'on peut encore utiliser à chaque instant de l'exercice maximal.

C'est en gardant à l'idée que la perception de la difficulté de l'effort était admise comme associée à la fréquence cardiaque (315) et à la consommation d'oxygène, que nous avons développé notre troisième étude. De ce fait, nous avons présumé, que les variables

physiologiques pourraient être les variables de contrôle de la stratégie de course intégrée dans un *central gouverneur*.

En effet, lorsque nous avons comparé la réalisation de quatre 3000m dans différentes conditions (étude 3), nous avons démontré que les coureurs étaient plus performants lorsque leur $\dot{V}O_2$ et fréquence cardiaque étaient stables plutôt que lorsqu'ils étaient libres de gérer leur course ou encore lorsque leurs vitesses étaient constantes.

Les résultats de l'étude de Jones et al., (309), confirmant que la cinétique de l'oxygène était significativement plus rapide dans les conditions de départ rapide à hautes intensités, nous ont conforté dans la nécessité de faire accélérer nos coureurs afin qu'ils atteignent rapidement leur état stable de $\dot{V}O_2$ ou fréquence cardiaque. Par la suite, afin de stabiliser ces variables de contrôle, les coureurs décéléraient, puis des ajustements continuels étaient réalisés jusqu'à la fin de l'épreuve. Les variations de vitesses étaient effectuées à la demande de l'expérimentateur de façon non systématique dans le seul but de maintenir des états stables.

Nous nous sommes appuyés sur les techniques de maintien de $\dot{V}O_2$ issues des recherches de Petot et al., (33) et Billat et al., (60), mais à notre connaissance nous sommes les premiers à pouvoir contrôler le $\dot{V}O_2$ du coureur sur le terrain grâce aux analyseurs portatifs équipés de connecteurs sans fils longues distances. Puisque, rappelons-le, Petot et al., (33) et Billat et al., (60) devaient utiliser tout un plateau technique en laboratoire afin de permettre à l'expérimentateur d'ajuster le plus rapidement possible la puissance en étant sûr de maintenir $\dot{V}O_2$ au maximum. En outre, le fait que notre étude se déroulait sur le terrain, n'engageait pas uniquement l'opérateur qui contrôlait l'ajustement de la vitesse mais bien le couple expérimentateur/coureur, puisque, le coureur avait le libre arbitre d'interpréter la consigne de l'opérateur au gré de ses sensations. Le *gouverneur central* est bien toujours présent dans cette condition d'exercice.

Nous avons également montré dans cette étude que la course libre n'améliorait pas significativement la performance comparée à la course à vitesse constante. Cela pourrait être dû au fait que la course libre n'est pas perçue comme moins pénible que la course à vitesse constante, même si, en course libre il peut y avoir un sprint final améliorant les performances (185, 204). Effectivement, grâce à l'utilisation des nouvelles technologies (montres cardio GPS, plateforme d'enregistrement et de partage des courses) plusieurs études ont établi que, dans certaines disciplines, les athlètes diminuent progressivement leur allure avant d'augmenter celle-ci en fin d'épreuve (152, 185). Il est d'ailleurs convenu, que cette augmentation d'intensité finale de l'exercice est la conséquence d'une augmentation du recrutement neuromusculaire (320)

reliée à la capacité du sportif à resynthétiser l'énergie par voie anaérobie en fin d'épreuve (158). Ainsi, le choix de la stratégie d'allure n'apparaît pas ordonné uniquement par la modification des afférences physiologiques engendrées par l'exercice, mais est aussi fonction de l'usage passé et de la durée d'effort appréciée (149). En effet, ce type de stratégie (départ rapide, diminution de l'allure puis augmentation finale), modélisé par des courbes en U, en J, ou en J inversé (149), a été rapporté par Garland et al., (159) dans une autre discipline que la course à pied et très récemment par Billat et al., (164) chez les marathonien élites. Nos résultats concordent avec ces modélisations de course puisque nos sujets passent plus de 50% du temps de la course en dessous de la vitesse moyenne de leur course dans les conditions de 3000 m à état stable physiologique ($\dot{V}O_2$ et fréquence cardiaque).

Par ailleurs, deux facteurs clés de la performance en endurance qui sont liés à $\dot{V}O_{2max}$ sont le coût en oxygène et le coût cardiaque. En accord avec la littérature nous avons démontré que lorsque le coût en oxygène et le coût cardiaque étaient diminués, comparés à d'autres conditions de course pour la même distance parcourue (étude 3), cela coïncidait avec une meilleure performance. De plus les valeurs du coût en oxygène dans ces conditions de performance optimum $0,20 \pm 0,05$ ($\dot{V}O_2$ constant) et $0,22 \pm 0,03$ mL O_2 .kg $^{-1}$.m $^{-1}$ (fréquence cardiaque constante) sont similaires à celles des 3000m étudiés par Duffield et al., (184).

Dans notre travail, le contrôle de la course par les variables physiologiques a permis de déterminer une stratégie optimale de course pour les coureurs de loisir, équivalente à celles des élites, étudiée par Billat et al., en 2019. Il est cependant essentiel de rappeler que ces stratégies sont dues au fait que nous contrôlions les variables physiologiques qui sous-tendent ces performances.

En somme, les coureurs éprouvent donc une difficulté à choisir une vitesse cible sur une distance puisque leur connaissance des vitesses cibles a été établie à partir d'anciens concepts de seuil de vitesses physiologiques. En effet, la Figure 18 illustre le modèle (paradigme) actuel élaboré depuis ces 100 dernières années à partir de $\dot{V}O_{2max}$ et des modèles à vitesse constante permettant de définir des vitesses physiologiques seuils.

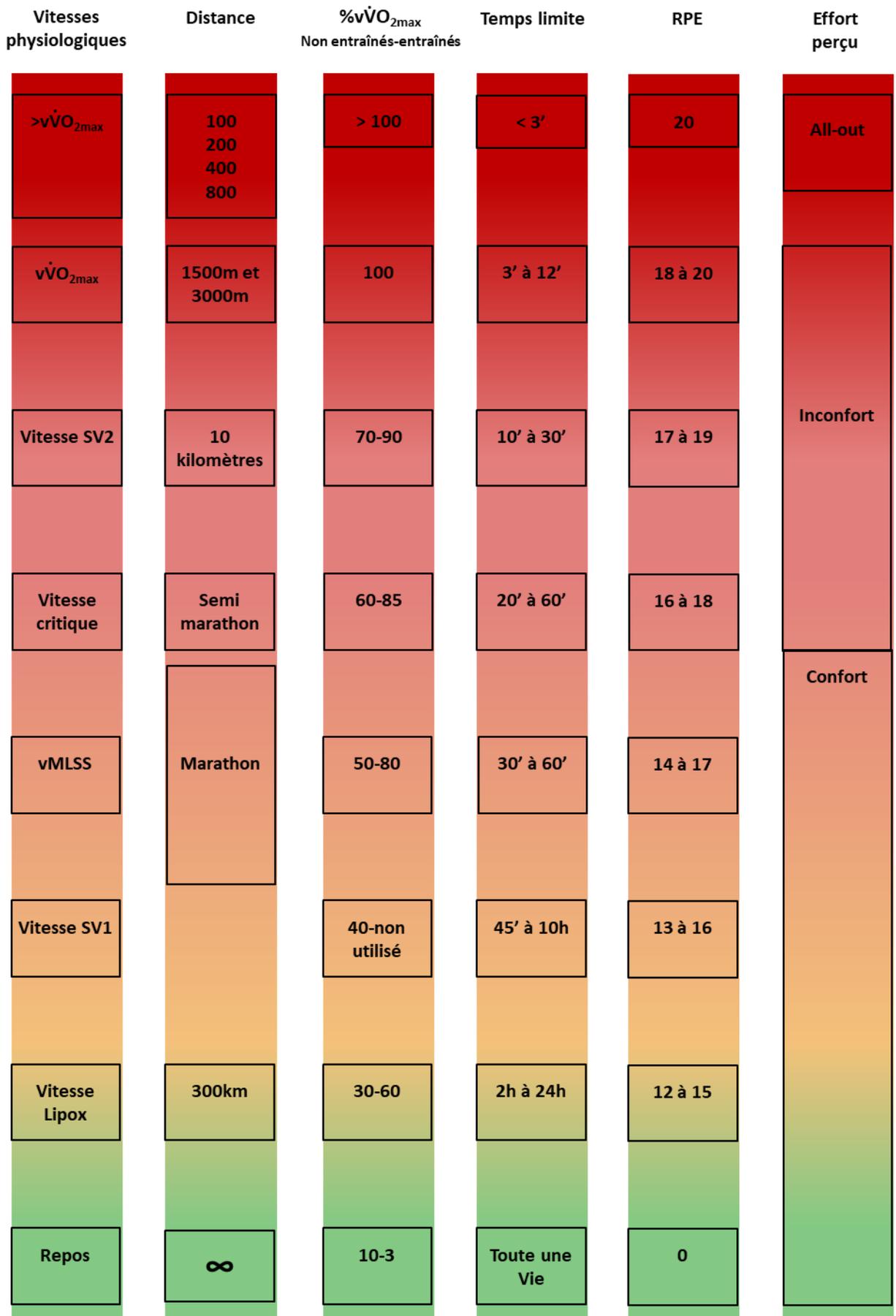


Figure 18 : Représentation schématique du modèle à double entrée permettant de choisir sa vitesse cible sur une course.

Nous pouvons constater (Figure 18, colonne 2), qu'en fonction des distances de course, on peut associer des pourcentages de vitesse à $\dot{V}O_{2max}$. De fait, les coureurs ont été orientés vers des stratégies de course sans justement prendre en compte les conséquences de la notion de l'effet de seuil, à savoir, qu'une erreur de vitesse de l'ordre de 5% pouvait induire une fatigue précoce définie comme un non maintien d'une vitesse voire même d'un effondrement de cette vitesse. Cet effondrement est responsable de l'asymétrie négative du profil de la course, illustrant que l'athlète parcourait plus de distance au-dessus de sa vitesse moyenne de course du fait de la chute de vitesse dans les derniers kilomètres de sa course. Par conséquent, le paradigme $\dot{V}O_{2max}$ - vitesse physiologique élaboré à partir de protocoles à vitesses constantes a comme enfermé le coureur dans une course « robot » reproduisant ainsi la recherche d'une vitesse constante, facilement paramétrable sur les montres cardio-GPS, l'amenant ainsi à la rupture de cette constance.

Nous gageons que notre travail puisse inaugurer un nouveau paradigme libérateur de la recherche de référents physiologiques. En effet, il s'agira avant de parvenir à une course dite « libérée » de former, d'éduquer le coureur à ses sensations, en lui fournissant un biofeedback en temps réel ou par un travail en feedforward grâce à un plan d'action construit sur des sensations. Le coureur apprendra alors à différencier puis reconnaître une sensation attendue d'une sensation réelle au fur et à mesure qu'il progresse sur la course. De fait, nous pourrions envisager un modèle de course construit à fortiori sur des états perçus s'échelonnant de faciles à maximaux. Le test RABIT[®] permet justement d'éduquer le coureur à sa perception par cette bijection à l'instant t, entre sensation et état physiologique associé. Nous pourrions alors déconnecter numériquement le coureur qui sera affranchi de cette digitalisation certes bénéfique dans l'éducation mais aliénante dans le temps.

CHAPITRE 4 : CONCLUSION ET PERSPECTIVES

En fin de compte même si la consommation maximale d'oxygène reste le cœur de la physiologie de l'exercice, à travers l'objectif général de ce travail de thèse, nous avons pu mettre en évidence que les expérimentateurs des situations protocolaires d'antan ne raisonnaient qu'autour des limites de l'Homme. De fait, replacer les sensations du coureur comme facteur d'influence majeur de la performance permet d'envisager de trouver d'autre manière de faire progresser les performances sans aborder les limites.

En conclusion, tout d'abord, notre première étude a permis de démontrer que les athlètes étaient capables de reproduire les réponses physiologiques à des intensités sous-maximales et maximales en utilisant une montre et un cardio GPS. Cela permettra aux entraîneurs et aux athlètes de mener un protocole de terrain spécifique à la course à pied qui prédit potentiellement avec précision le $\dot{V}O_{2max}$ et fournit des données précieuses qui peuvent ensuite être utilisées pour prescrire un entraînement efficace pour améliorer la performance. Le test RABIT[®] pourrait ainsi constituer un nouvel outil pour définir les différentes zones d'entraînement et produire ainsi un plan d'entraînement adapté à la condition physique du coureur.

Ensuite, notre seconde étude a permis, d'entrevoir un nouvel aperçu des contributions des systèmes énergétiques pendant la course à pied basé sur une nouvelle façon de considérer le rôle de $\dot{V}O_{2max}$ et de la production d'énergie associée dans tous les types d'exercices, sans avoir besoin de distinguer les contributions aérobie et anaérobie. L'énergie à $\dot{V}O_{2max}$ dépend du temps mis pour atteindre $\dot{V}O_{2max}$ et pourrait être un facteur limitant de la performance.

Enfin, notre troisième étude sur le 3000m nous a permis de comprendre que même si l'on utilise des variables physiologiques (fréquence cardiaque, $\dot{V}O_2$) considérées comme limitantes de la performance, en tant que variable contrôle de la performance, celles-ci s'avéraient efficaces pour réaliser une performance. L'imposition d'un état stable de $\dot{V}O_2$ ou fréquence cardiaque à la valeur moyenne de la course libre, permet aux coureurs d'améliorer sa performance avec une distribution de la vitesse plus favorable et une contrainte physiologique plus faible que lors d'une course régulée par l'unique perception ou encore par la contrainte de vitesse.

Toutefois, ces trois études ne permettent pas de comprendre la stratégie de course pour un effort perçu constant sur une distance donnée. Autrement dit, on ne sait comment le coureur associe une perception de l'effort à une vitesse en fonction du temps. De plus, nous ne savons pas si la variation de vitesse est intégrée par les coureurs et s'il s'agit d'une variable dépendante,

indépendante de la performance ou encore un compromis des deux. En particulier, lorsque le coureur est proche de son débit maximal d'oxygène.

Par la suite, afin de confirmer les résultats obtenus, il serait intéressant de réaliser le test RABIT[®] sur un plus grand nombre de sujets pour ainsi pouvoir démontrer une corrélation entre les efforts sous maximaux, l'atteinte de $\dot{V}O_{2max}$ et la forme actuelle du coureur. Cet élargissement du nombre de sujets permettrait également d'adapter ce test à la marche afin d'inciter les personnes sédentaires qui ne savent pas comment se remettre à l'activité sans craindre de retomber dans l'inconfort que leur procuraient les activités physiques qui ne tenaient pas compte du niveau actuel de leur forme physique et mentale.

L'étude sur l'énergie à $\dot{V}O_{2max}$ serait à approfondir en demandant au coureur d'associer les zones de perception d'effort du test RABIT[®] à des moments précis de la course, afin dans un premier temps de mettre en phase les réponses physiologiques et les perceptions et dans un second temps d'établir une reproductibilité au moins intra-sujet.

Etant donnée, que le modèle du *Gouverneur central* propose que l'inconfort vécu lors de l'exercice diminue progressivement le désir conscient de vouloir dépasser notre mécanisme de protection. Cette théorie invite donc à prendre en compte le rôle de la motivation dans le choix des stratégies d'allure. Les psychologues et physiologistes qui ont étudié la motivation s'accordent pour dire que la motivation est dirigée vers un but et est exprimée dans le cadre de situations autodéterminées (Baron et al. 2010). Les individus développent ainsi des stratégies destinées à leur permettre d'atteindre leurs buts.

De ce fait, à terme, connaître les sensations du coureur lors d'une course, permettrait de pouvoir prédire une stratégie de course, un profil à adopter non pas en termes de vitesse mais bien en termes de sensations afin d'optimiser les performances du coureur sans aborder ses limites le jour de la course officielle.

Concernant les épreuves de 3000 m, pour aller plus loin dans la démarche, il serait intéressant, d'étudier la reproductibilité d'un 3000m à $\dot{V}O_2$ ou à fréquence cardiaque constant en termes de performance. D'autre part il faudrait que les coureurs réalisent à nouveau un 3000m libre après avoir complété plusieurs essais à $\dot{V}O_2$ ou fréquence cardiaque stable, afin de déterminer si le coureur conserve cette fenêtre de constance physiologique, comme une sorte de configuration, de profil de course.

En résumé, ce travail propose un nouveau paradigme issu de nouvelles situations expérimentales, dans lesquelles nous avons isolé les facteurs d'influence dans un contexte de performance.

Placer la perception de l'effort au centre de l'activité physique permet en outre d'inscrire ce travail de thèse dans une perspective de santé publique, par exemple en donnant des pistes sur la relation dose-effet de l'activité physique, c'est-à-dire, la durée, l'intensité... (test RABIT® étude 1). Mais aussi en démontrant que la performance n'est pas une lutte permanente contre la barrière des limites cardio-respiratoires mais une compréhension et une adaptation de la gouvernance de son état de forme (études 2 et 3).

REFERENCES

1. Scheiman J, Lubner JM, Chavkin TA, MacDonald T, Tung A, Pham L-D, et al. Meta-omics analysis of elite athletes identifies a performance-enhancing microbe that functions via lactate metabolism. *Nat Med.* juill 2019;25(7):1104-9.
2. Admin. Texte de Claude Bernard : la méthode expérimentale. | fhqanv [Internet]. fhqanv. 2018 [cité 22 nov 2019]. Disponible sur: <https://fhqanv.fr/texte-de-claude-bernard-la-methode-experimentale/>
3. Introduction à l'étude de la médecine expérimentale par m. Claude Bernard. Baillière; 1865. 460 p.
4. Hill AV. *Muscular Movement in Man : the Factors governing Speed and Recovery from Fatigue.* 370, Seventh Avenue, New York; 6 et 8, rue Bouverie, Londres EC4.: McGraw-Hill Book Company, Inc.; 1927.
5. Malherbe J-F. Thomas S. Kuhn, La structure des révolutions scientifiques. *Rev Philos Louvain.* 1974;72(15):634-9.
6. Helou NE. Evolution des performances sportives : apport de l'épidémiologie pour l'analyse des performances sportives et des influences physiologiques, technologiques, génétiques et environnementales sur les progressions humaines au cours de l'ère olympique. 8 févr 2011 [cité 22 nov 2019]; Disponible sur: <https://hal-insep.archives-ouvertes.fr/tel-01788555>
7. di Prampero PE. The energy cost of human locomotion on land and in water. *Int J Sports Med.* avr 1986;7(2):55-72.
8. Joyner MJ. Modeling: optimal marathon performance on the basis of physiological factors. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. févr 1991;70(2):683-7.
9. Jones AM, Vanhatalo A. The 'Critical Power' Concept: Applications to Sports Performance with a Focus on Intermittent High-Intensity Exercise. *Sports Med.* 1 mars 2017;47(1):65-78.
10. Billat V, Brunel NJ-B, Carbillet T, Labbé S, Samson A. Humans are able to self-paced constant running accelerations until exhaustion. *Phys Stat Mech Its Appl.* 15 sept 2018;506:290-304.
11. Hill AV, Lupton H. Muscular Exercise, Lactic Acid, and the Supply and Utilization of Oxygen. *QJM Int J Med.* 1 janv 1923;os-16(62):135-71.
12. Jones AM, Grassi B, Christensen PM, Krusturup P, Bangsbo J, Poole DC. Slow component of VO₂ kinetics: mechanistic bases and practical applications. *Med Sci Sports Exerc.* nov 2011;43(11):2046-62.
13. Kolkhorst FW, Rezende RS, Levy SS, Buono MJ. Effects of sodium bicarbonate on VO₂ kinetics during heavy exercise. *Med Sci Sports Exerc.* nov 2004;36(11):1895-9.
14. Lohmann K. Ueber die Pyrophosphatfraktion im Muskel [Internet]. *Naturwissenschaften.*

- 1929 [cité 27 août 2019]. Disponible sur: <https://edoc.mdc-berlin.de/9123/>
15. Lundsgaard E. Untersuchungen uber Muskelkontraktionen ohne Milchsäurebildung. *Biochem Z.* 1930;227:51-82.
 16. Margaria R, Cerretelli P, di Prampero PE, Massari C, Torelli G. Kinetics and mechanism of oxygen debt contraction in man. *J Appl Physiol.* 1 mars 1963;18(2):371-7.
 17. Margaria R, Aghemo P, Sassi G. Lactic acid production in supramaximal exercise. *Pflüg Arch.* 1 juin 1971;326(2):152-61.
 18. Hill Archibald Vivian, Long C. N. H., Lupton H. Muscular exercise, lactic acid and the supply and utilisation of oxygen.— Parts VII–VIII. *Proc R Soc Lond Ser B Contain Pap Biol Character.* 1 déc 1924;97(682):155-76.
 19. Bassett DR. Scientific contributions of A. V. Hill: exercise physiology pioneer. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. nov 2002;93(5):1567-82.
 20. Zhou H, Lai N, Saidel GM, Cabrera ME. Multiscale modeling of respiration. *IEEE Eng Med Biol Mag.* mai 2009;28(3):34-40.
 21. Brooks GA. Anaerobic threshold: review of the concept and directions for future research. *Med Sci Sports Exerc.* févr 1985;17(1):22-34.
 22. Ettema JH. Limits of human performance and energy-production. *Int Z Für Angew Physiol Einschließlich Arbeitsphysiologie.* 1 mars 1966;22(1):45-54.
 23. MONOD H, SCHERRER J. The Work Capacity of a Synergic Muscular Group. *Ergonomics.* 1 juill 1965;8(3):329-38.
 24. POOLE DC, WARD SA, GARDNER GW, WHIPP BJ. Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. *Ergonomics.* 1 sept 1988;31(9):1265-79.
 25. Poole DC, Ward SA, Whipp BJ. The effects of training on the metabolic and respiratory profile of high-intensity cycle ergometer exercise. *Eur J Appl Physiol.* 1 janv 1990;59(6):421-9.
 26. Hill D, Poole D, Smith J. The relationship between power and the time to achieve $\dot{V}O_{2max}$. *Med Sci Sports Exerc.* avr 2002;34(4):709-14.
 27. Zoladz JA, Rademaker AC, Sargeant AJ. Non-linear relationship between O_2 uptake and power output at high intensities of exercise in humans. *J Physiol.* 1995;488(1):211-7.
 28. Korzeniewski B, Zoladz JA. Biochemical Background of the VO_2 On-Kinetics in Skeletal Muscles. *J Physiol Sci.* 2006;56(1):1-12.
 29. OÅstrand P-O, Saltin B. Maximal oxygen uptake and heart rate in various types of muscular activity. *J Appl Physiol.* 1 nov 1961;16(6):977-81.
 30. Barker T, Poole DC, Noble ML, Barstow TJ. Human critical power-oxygen uptake relationship at different pedalling frequencies. *Exp Physiol.* mai 2006;91(3):621-32.
 31. Jones AM, Vanhatalo A, Burnley M, Morton RH, Poole DC. Critical power: implications for determination of $\dot{V}O_{2max}$ and exercise tolerance. *Med Sci Sports Exerc.* oct

- 2010;42(10):1876-90.
32. MORITANI T, NAGATA A, DEVRIES HA, MURO M. Critical power as a measure of physical work capacity and anaerobic threshold. *Ergonomics*. 1 mai 1981;24(5):339-50.
 33. Petot H, Meilland R, Le Moyec L, Mille-Hamard L, Billat VL. A new incremental test for VO₂max accurate measurement by increasing VO₂max plateau duration, allowing the investigation of its limiting factors. *Eur J Appl Physiol*. 1 juin 2012;112(6):2267-76.
 34. Wasserman K, Beaver WL, Whipp BJ. Gas exchange theory and the lactic acidosis (anaerobic) threshold. *Circulation*. janv 1990;81(1 Suppl):III4-30.
 35. Londeree BR, Ames SA. Maximal steady state versus state of conditioning. *Eur J Appl Physiol*. 1 déc 1975;34(1):269-78.
 36. LaFontaine TP, Londeree BR, Spath WK. The maximal steady state versus selected running events. *Med Sci Sports Exerc*. 1981;13(3):190-3.
 37. Antonini M-T, Billat V, Blanc P, Chassain A-P, Dalmay F, Menier R, et al. Comparaison de la lactatémie en régime transitoire et en régime stationnaire d'exercice musculaire. *Sci Sports*. 1 mai 1987;2(1):41-4.
 38. Denis C, Dormois D, Castells J, Bonnefoy R, Padilla S, Geysant A, et al. Comparison of incremental and steady state tests of endurance training. *Eur J Appl Physiol*. 1 mars 1988;57(4):474-81.
 39. Nagle F, Robinhold D, Howley E, Daniels J, Baptista G, Stoedefalke K. Lactic acid accumulation during running at submaximal aerobic demands. *Med Sci Sports*. déc 1970;2(4):182-6.
 40. Billat V, Dalmay F, Antonini MT, Chassain AP. A method for determining the maximal steady state of blood lactate concentration from two levels of submaximal exercise. *Eur J Appl Physiol*. 1994;69(3):196-202.
 41. Stegmann H, Kindermann W, Schnabel A. Lactate Kinetics and Individual Anaerobic Threshold*. *Int J Sports Med*. août 1981;02(3):160-5.
 42. Chassain A-P. Méthode d'appréciation objective de la tolérance de l'organisme à l'effort: application à la mesure des puissances critiques de la fréquence cardiaque et de la lactatémie. *Sci Sports*. 1 janv 1986;1(1):41-8.
 43. Hermansen L, Vaage O. Lactate disappearance and glycogen synthesis in human muscle after maximal exercise. *Am J Physiol-Endocrinol Metab*. 1 nov 1977;233(5):E422.
 44. Hermansen L, Stensvold I. Production and Removal of Lactate during Exercise in Man. *Acta Physiol Scand*. 1972;86(2):191-201.
 45. Connett RJ, Gayeski TE, Honig CR. Lactate efflux is unrelated to intracellular PO₂ in a working red muscle in situ. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. août 1986;61(2):402-8.
 46. Hughson RL, Weisiger KH, Swanson GD. Blood lactate concentration increases as a continuous function in progressive exercise. *J Appl Physiol*. 1 mai 1987;62(5):1975-81.
 47. Jorfeldt L, Juhlin-Dannfelt A, Karlsson J. Lactate release in relation to tissue lactate in

- human skeletal muscle during exercise. *J Appl Physiol.* 1 mars 1978;44(3):350-2.
48. Favier RJ, Constable SH, Chen M, Holloszy JO. Endurance exercise training reduces lactate production. *J Appl Physiol.* 1 sept 1986;61(3):885-9.
 49. Pendergast D, Leibowitz R, Wilson D, Cerretelli P. The effect of preceding anaerobic exercise on aerobic and anaerobic work. *Eur J Appl Physiol.* 1 nov 1983;52(1):29-35.
 50. Myburgh KH, Viljoen A, Tereblanche S. Plasma lactate concentrations for self-selected maximal effort lasting 1 h. *Med Sci Sports Exerc.* janv 2001;33(1):152-6.
 51. Billat VL, Sirvent P, Py G, Koralsztein J-P, Mercier J. The concept of maximal lactate steady state: a bridge between biochemistry, physiology and sport science. *Sports Med Auckl NZ.* 2003;33(6):407-26.
 52. Wagner PD. Determinants of Maximal Oxygen Transport and Utilization. *Annu Rev Physiol.* 1996;58(1):21-50.
 53. Åstrand P-O, Saltin B. Oxygen uptake during the first minutes of heavy muscular exercise. *J Appl Physiol.* 1 nov 1961;16(6):971-6.
 54. Billat LV. Interval training for performance: a scientific and empirical practice. Special recommendations for middle- and long-distance running. Part I: aerobic interval training. *Sports Med Auckl NZ.* 2001;31(1):13-31.
 55. Buchheit M, Laursen PB. High-Intensity Interval Training, Solutions to the Programming Puzzle. *Sports Med.* 1 oct 2013;43(10):927-54.
 56. Billat LV. Use of blood lactate measurements for prediction of exercise performance and for control of training. Recommendations for long-distance running. *Sports Med Auckl NZ.* sept 1996;22(3):157-75.
 57. Billat V, Faina M, Sardella F, Marini C, Fanton F, Lupo S, et al. A comparison of time to exhaustion at VO₂ max in elite cyclists, kayak paddlers, swimmers and runners. *Ergonomics.* févr 1996;39(2):267-77.
 58. Péronnet F, Thibault G, Rhodes EC, McKenzie DC. Correlation between ventilatory threshold and endurance capability in marathon runners. *Med Sci Sports Exerc.* déc 1987;19(6):610-5.
 59. Renoux JC, Petit B, Billat V, Koralsztein JP. Oxygen deficit is related to the exercise time to exhaustion at maximal aerobic speed in middle distance runners. *Arch Physiol Biochem.* oct 1999;107(4):280-5.
 60. Billat V, Petot H, Karp JR, Sarre G, Morton RH, Mille-Hamard L. The sustainability of VO₂max: effect of decreasing the workload. *Eur J Appl Physiol.* févr 2013;113(2):385-94.
 61. Howley ET, Bassett DR, Welch HG. Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. *Med Sci Sports Exerc.* sept 1995;27(9):1292-301.
 62. Taylor HL, Buskirk E, Henschel A. Maximal Oxygen Intake as an Objective Measure of Cardio-Respiratory Performance. *J Appl Physiol.* juill 1955;8(1):73-80.
 63. Poole DC, Wilkerson DP, Jones AM. Validity of criteria for establishing maximal O₂

- uptake during ramp exercise tests. *Eur J Appl Physiol.* mars 2008;102(4):403-10.
64. Froelicher VF, Brammell H, Davis G, Noguera I, Stewart A, Lancaster MC. A Comparison of the Reproducibility and Physiologic Response to Three Maximal Treadmill Exercise Protocols. *Chest.* 1 mai 1974;65(5):512-7.
 65. St ACG, Lambert MI, Hawley JA, Broomhead SA, Noakes TD. Measurement of maximal oxygen uptake from two different laboratory protocols in runners and squash players. *Med Sci Sports Exerc.* août 1999;31(8):1226-9.
 66. Whipp BJ, Davis JA, Torres F, Wasserman K. A test to determine parameters of aerobic function during exercise. *J Appl Physiol.* janv 1981;50(1):217-21.
 67. Bassett DR, Howley ET. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc.* janv 2000;32(1):70-84.
 68. Saltin B, Strange S. Maximal oxygen uptake: « old » and « new » arguments for a cardiovascular limitation. *Med Sci Sports Exerc.* janv 1992;24(1):30-7.
 69. Bassett DR, Howley ET. Maximal oxygen uptake: « classical » versus « contemporary » viewpoints. *Med Sci Sports Exerc.* mai 1997;29(5):591-603.
 70. Astorino TA, Willey J, Kinnahan J, Larsson SM, Welch H, Dalleck LC. Elucidating determinants of the plateau in oxygen consumption at VO₂max. *Br J Sports Med.* sept 2005;39(9):655-60; discussion 660.
 71. Robergs RA. An exercise physiologist's « contemporary » interpretations of the « ugly and creaking edifices » of the VO₂max concept. *J Exerc Physiol Online.* 2001;4:1-44.
 72. Midgley AW, McNaughton LR, Polman R, Marchant D. Criteria for determination of maximal oxygen uptake: a brief critique and recommendations for future research. *Sports Med Auckl NZ.* 2007;37(12):1019-28.
 73. Astorino TA, Robergs RA, Ghiasvand F, Marks DW, Burns S. Incidence of the oxygen plateau at VO₂max during exercise testing to volitional fatigue. In 2000.
 74. Edvardsen E, Hem E, Anderssen SA. End Criteria for Reaching Maximal Oxygen Uptake Must Be Strict and Adjusted to Sex and Age: A Cross-Sectional Study. *PLOS ONE.* 14 janv 2014;9(1):e85276.
 75. Beltz NM, Gibson AL, Janot JM, Kravitz L, Mermier CM, Dalleck LC. Graded Exercise Testing Protocols for the Determination of VO₂max: Historical Perspectives, Progress, and Future Considerations [Internet]. *Journal of Sports Medicine.* 2016 [cité 27 août 2019]. Disponible sur: <https://www.hindawi.com/journals/jsm/2016/3968393/abs/>
 76. ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription - American College of Sports Medicine - Google Livres [Internet]. [cité 17 avr 2019]. Disponible sur: <https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=hhosAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=ACSM%E2%80%99s+Guidelines+for+exercise+Testing+and+Prescription+10th+Edn&ots=ljF72L4YRw&sig=5ax3uaKq-v8i7Mx77DrcxLnyGu0#v=onepage&q=ACSM%E2%80%99s%20Guidelines%20for%20exercise%20Testing%20and%20Prescription%2010th%20Edn&f=false>

77. Day JR, Rossiter HB, Coats EM, Skasick A, Whipp BJ. The maximally attainable $\dot{V}O_2$ during exercise in humans: the peak vs. maximum issue. *J Appl Physiol*. 1 nov 2003;95(5):1901-7.
78. Midgley AW, McNaughton LR, Carroll S. Verification phase as a useful tool in the determination of the maximal oxygen uptake of distance runners. *Appl Physiol Nutr Metab*. 1 oct 2006;31(5):541-8.
79. Midgley AW, Carroll S, Marchant D, McNaughton LR, Siegler J. Evaluation of true maximal oxygen uptake based on a novel set of standardized criteria. *Appl Physiol Nutr Metab Physiol Appl Nutr Metab*. avr 2009;34(2):115-23.
80. Rossiter HB, Kowalchuk JM, Whipp BJ. A test to establish maximum O₂ uptake despite no plateau in the O₂ uptake response to ramp incremental exercise. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. mars 2006;100(3):764-70.
81. Hawkins MN, Raven PB, Snell PG, Stray-Gundersen J, Levine BD. Maximal oxygen uptake as a parametric measure of cardiorespiratory capacity. *Med Sci Sports Exerc*. janv 2007;39(1):103-7.
82. Astorino TA, DeRevere J. Efficacy of constant load verification testing to confirm VO₂ max attainment. *Clin Physiol Funct Imaging*. juill 2018;38(4):703-9.
83. Schaun GZ. The Maximal Oxygen Uptake Verification Phase: a Light at the End of the Tunnel? *Sports Med - Open*. 8 déc 2017;3(1):44.
84. Silva R, Damasceno M, Cruz R, Silva-Cavalcante MD, Lima-Silva AE, Bishop DJ, et al. Effects of a 4-week high-intensity interval training on pacing during 5-km running trial. *Braz J Med Biol Res [Internet]*. 2017 [cité 27 août 2019];50(12). Disponible sur: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0100-879X2017001200612&lng=en&nrm=iso&tlng=en
85. Barnes KR, Kilding AE. Running economy: measurement, norms, and determining factors. *Sports Med - Open*. 27 mars 2015;1(1):8.
86. Conley DL, Krahenbuhl GS. Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 1980;12(5):357-60.
87. Saunders PU, Pyne DB, Telford RD, Hawley JA. Factors Affecting Running Economy in Trained Distance Runners. *Sports Med*. 1 juin 2004;34(7):465-85.
88. Thomas D, Fernhall B, Granat H. Changes in Running Economy During a 5-km Run in Trained Men and Women Runners. *J Strength Cond Res*. mai 1999;13(2):162-7.
89. Daniels JT. A physiologist's view of running economy. *Med Sci Sports Exerc*. juin 1985;17(3):332-8.
90. Daniels J, Daniels N. Running economy of elite male and elite female runners. *Med Sci Sports Exerc*. avr 1992;24(4):483-9.
91. Costill D, Thomason H, Roberts E. Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Med Sci Sports*. déc 1973;5(4):248-52.
92. Lacour JR, Padilla-Magunacelaya S, Chatard JC, Arsac L, Barthélémy JC. Assessment of

- running velocity at maximal oxygen uptake. *Eur J Appl Physiol.* 1991;62(2):77-82.
93. Iaiche R, Toraa M, Friemel F. Évaluation de VO₂ max et de VMA, en laboratoire et sur le terrain. *Sci Sports.* 1 janv 1996;11(2):91-5.
 94. Berthoin S, Pelayo P, LenseL-CorbeiP G, Robin H, Gerbeaux M. Comparison of Maximal Aerobic Speed as Assessed with Laboratory and Field Measurements in Moderately Trained Subjects. *Int J Sports Med.* oct 1996;17(7):525-9.
 95. Léger L, Gadoury C. Validity of the 20 m shuttle run test with 1 min stages to predict VO₂max in adults. *Can J Sport Sci J Can Sci Sport.* mars 1989;14(1):21-6.
 96. Léger LA, Mercier D, Gadoury C, Lambert J. The multistage 20 metre shuttle run test for aerobic fitness. *J Sports Sci.* 1 juin 1988;6(2):93-101.
 97. Berthoin S, Gerbeaux M, Guerrin F, LenseL-Corbeil G, Vandendorpe F. Estimation de la VMA. *Sci Sports.* 1 oct 1992;7(2):85-91.
 98. Léger L, Ahmaidi S, Berthoin S, Cazorla G, Fargeas MA., Gerbeaux M, LenseL-Corbeil G., Prefaut, C. Estimation of the maximal aerobic speed from the maximal 20-m shuttle run test. *Ped Exerc Sci* 5. 1993;
 99. Léger L, Boucher R. An indirect continuous running multistage field test: the Université de Montréal track test. *Can J Appl Sport Sci J Can Sci Appl Au Sport.* juin 1980;5(2):77-84.
 100. Billat LV, Koralsztein JP. Significance of the Velocity at $\dot{V}O_{2max}$ and Time to Exhaustion at this Velocity. *Sports Med.* 1 août 1996;22(2):90-108.
 101. Morgan DW, Baldini FD, Martin PE, Kohrt WM. Ten kilometer performance and predicted velocity at VO₂max among well-trained male runners. *Med Sci Sports Exerc.* févr 1989;21(1):78-83.
 102. Di Prampero PE, Capelli C, Pagliaro P, Antonutto G, Girardis M, Zamparo P, et al. Energetics of best performances in middle-distance running. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. mai 1993;74(5):2318-24.
 103. Hill DW, Rowell AL. Running velocity at VO₂max. *Med Sci Sports Exerc.* janv 1996;28(1):114-9.
 104. Karlsson J, Astrand PO, Ekblom B. Training of the oxygen transport system in man. *J Appl Physiol.* 1 juin 1967;22(6):1061-5.
 105. Blondel N, Berthoin S, Billat V, LenseL G. Relationship between run times to exhaustion at 90, 100, 120, and 140% of vVO₂max and velocity expressed relatively to critical velocity and maximal velocity. *Int J Sports Med.* janv 2001;22(1):27-33.
 106. Jones AM, Carter H. The Effect of Endurance Training on Parameters of Aerobic Fitness. *Sports Med.* 1 juin 2000;29(6):373-86.
 107. Smith TP, Coombes JS, Geraghty DP. Optimising high-intensity treadmill training using the running speed at maximal O₂ uptake and the time for which this can be maintained. *Eur J Appl Physiol.* mai 2003;89(3-4):337-43.

108. Stratton E, O'Brien BJ, Harvey J, Blitvich J, McNicol AJ, Janissen D, et al. Treadmill Velocity Best Predicts 5000-m Run Performance. *Int J Sports Med.* janv 2009;30(1):40-5.
109. Machado FA, Kravchychyn ACP, Peserico CS, da Silva DF, Mezzaroba PV. Incremental test design, peak « aerobic » running speed and endurance performance in runners. *J Sci Med Sport.* nov 2013;16(6):577-82.
110. Noakes TD, Myburgh KH, Schall R. Peak treadmill running velocity during the VO₂ max test predicts running performance. *J Sports Sci.* 1990;8(1):35-45.
111. Farrell P, Wilmore J, Coyle E, Billing J, Costill D. Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med Sci Sports.* déc 1979;11(4):338-44.
112. Heck H, Mader A, Hess G, Mücke S, Müller R, Hollmann W. Justification of the 4-mmol/l lactate threshold. *Int J Sports Med.* juin 1985;6(3):117-30.
113. Yoshida T. Effect of exercise duration during incremental exercise on the determination of anaerobic threshold and the onset of blood lactate accumulation. *Eur J Appl Physiol.* 1984;53(3):196-9.
114. Wyatt FB. Comparison of Lactate and Ventilatory Threshold to Maximal Oxygen Consumption: A Meta-Analysis. *J Strength Cond Res.* févr 1999;13(1):67.
115. Ghosh AK. Anaerobic Threshold: Its Concept and Role in Endurance Sport. *Malays J Med Sci MJMS.* janv 2004;11(1):24-36.
116. Kang J, Chaloupka EC, Mastrangelo MA, Biren GB, Robertson RJ. Physiological comparisons among three maximal treadmill exercise protocols in trained and untrained individuals. *Eur J Appl Physiol.* 1 avr 2001;84(4):291-5.
117. Plato PA, McNulty M, Crunk SM, Ergun AT. Predicting Lactate Threshold Using Ventilatory Threshold. *Int J Sports Med.* sept 2008;29(9):732-7.
118. Jenkins LA, Mauger AR, Hopker JG. Age differences in physiological responses to self-paced and incremental $\dot{V}O_2$ max testing. In 2016.
119. Black MI, Durant J, Jones AM, Vanhatalo A. Critical power derived from a 3-min all-out test predicts 16.1-km road time-trial performance. *Eur J Sport Sci.* 3 avr 2014;14(3):217-23.
120. Caiozzo VJ, Davis JA, Ellis JF, Azus JL, Vandagriff R, Prietto CA, et al. A comparison of gas exchange indices used to detect the anaerobic threshold. *J Appl Physiol.* nov 1982;53(5):1184-9.
121. Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. juin 1986;60(6):2020-7.
122. Bosquet L, Léger L, Legros P. Methods to Determine Aerobic Endurance. *Sports Med.* 1 sept 2002;32(11):675-700.
123. Faude O, Kindermann W, Meyer T. Lactate Threshold Concepts. *Sports Med.* 1 juin 2009;39(6):469-90.
124. Beneke R, Leithäuser RM, Ochentel O. Blood Lactate Diagnostics in Exercise Testing and

- Training. *Int J Sports Physiol Perform.* 1 mars 2011;6(1):8-24.
125. Seiler K, Sjørusen J. EFFECT OF WORK BOUT DURATION ON PHYSIOLOGICAL AND PERCEPTUAL RESPONSES TO INTERVAL TRAINING IN RUNNERS. *Med Sci Sports Exerc* [Internet]. mai 2002 [cité 28 août 2019];34(5). Disponible sur: insights.ovid.com
 126. Bergstrom HC, Housh TJ, Zuniga JM, Traylor DA, Camic CL, Lewis RW, et al. The Relationships Among Critical Power Determined From a 3-Min All-Out Test, Respiratory Compensation Point, Gas Exchange Threshold, and Ventilatory Threshold. *Res Q Exerc Sport.* 1 juin 2013;84(2):232-8.
 127. Rabadán* M, Díaz* V, Calderón FJ, Benito PJ, Peinado AB, Maffulli N. Physiological determinants of speciality of elite middle- and long-distance runners. *J Sports Sci.* 1 juin 2011;29(9):975-82.
 128. Christensen EH, Hedman R, Saltin B. Intermittent and Continuous Running (A further contribution to the physiology of intermittent work.). *Acta Physiol Scand.* 1960;50(3-4):269-86.
 129. Morton RH, Billat LV. The critical power model for intermittent exercise. *Eur J Appl Physiol.* mars 2004;91(2-3):303-7.
 130. Åstrand I, Åstrand P-O, Christensen EH, Hedman R. Intermittent Muscular Work. *Acta Physiol Scand.* 1960;48(3-4):448-53.
 131. Gorostiaga EM, Walter CB, Foster C, Hickson RC. Uniqueness of interval and continuous training at the same maintained exercise intensity. *Eur J Appl Physiol.* 1 août 1991;63(2):101-7.
 132. Billat VL, Slawinski J, Bocquet V, Demarle A, Lafitte L, Chassaing P, et al. Intermittent runs at the velocity associated with maximal oxygen uptake enables subjects to remain at maximal oxygen uptake for a longer time than intense but submaximal runs. *Eur J Appl Physiol.* févr 2000;81(3):188-96.
 133. Billat VL, Blondel N, Berthoin S. Determination of the velocity associated with the longest time to exhaustion at maximal oxygen uptake. *Eur J Appl Physiol.* juill 1999;80(2):159-61.
 134. Billat VL, Slawinski J, Bocquet V, Chassaing P, Demarle A, Koralsztejn JP. Very short (15s-15s) interval-training around the critical velocity allows middle-aged runners to maintain VO₂ max for 14 minutes. *Int J Sports Med.* avr 2001;22(3):201-8.
 135. Midgley AW, Mc Naughton LR. Time at or near VO₂max during continuous and intermittent running. A review with special reference to considerations for the optimisation of training protocols to elicit the longest time at or near VO₂max. *J Sports Med Phys Fitness.* mars 2006;46(1):1-14.
 136. Bacon AP, Carter RE, Ogle EA, Joyner MJ. VO₂max Trainability and High Intensity Interval Training in Humans: A Meta-Analysis. *PLOS ONE.* 16 sept 2013;8(9):e73182.
 137. Esfarjani F, Laursen PB. Manipulating high-intensity interval training: Effects on V'O₂ max, the lactate threshold and 3000m running performance in moderately trained

- males. *J Sci Med Sport*. 1 févr 2007;10(1):27-35.
138. O'Brien BJ, Wibskov J, Knez WL, Paton CD, Harvey JT. The effects of interval–exercise duration and intensity on oxygen consumption during treadmill running. *J Sci Med Sport*. 1 juin 2008;11(3):287-90.
 139. Laursen PB, Jenkins DG. The Scientific Basis for High-Intensity Interval Training. *Sports Med*. 1 janv 2002;32(1):53-73.
 140. Cooper KH. A Means of Assessing Maximal Oxygen Intake: Correlation Between Field and Treadmill Testing. *JAMA*. 15 janv 1968;203(3):201-4.
 141. Daniels JT. *Daniels' Running Formula*. Human Kinetics; 2013. 320 p.
 142. Mitchell JH, Sproule BJ, Chapman CB. The physiological meaning of the maximal oxygen intake test. *J Clin Invest*. avr 1958;37(4):538-47.
 143. Newton J. THE ASSESSMENT OF MAXIMAL OXYGEN INTAKE. *J Sports Med Phys Fitness*. 1963;3:164-9.
 144. Berthon P, Fellmann N, Bedu M, Beaune B, Dabonneville M, Coudert J, et al. A 5-min running field test as a measurement of maximal aerobic velocity. *Eur J Appl Physiol*. 1 févr 1997;75(3):233-8.
 145. Brikci A, Dekkar N. Validité de la course de 5 minutes pour l'estimation de VO₂max chez le coureur à pied. *Sci Motricité*. 1989;(8):31-7.
 146. Katch FI, Pechar GS, McArdle WD, Weltman AL. Relationship between individual differences in a steady pace endurance running performance and maximal oxygen intake. *Res Q*. mai 1973;44(2):206-15.
 147. Chamoux A, Berthon P, Laubignat JF. Determination of maximum aerobic velocity by a five minute test with reference to running world records. A theoretical approach. *Arch Physiol Biochem*. 1996;104(2):207-11.
 148. McCole SD, Davis AM, Fueger PT. Is there a disassociation of maximal oxygen consumption and maximal cardiac output? *Med Sci Sports Exerc*. août 2001;33(8):1265-9.
 149. Abbiss CR, Laursen PB. Describing and Understanding Pacing Strategies during Athletic Competition. *Sports Med*. 1 mars 2008;38(3):239-52.
 150. Bishop D, Bonetti D, Dawson B. The influence of pacing strategy on VO₂ and supramaximal kayak performance. *Med Sci Sports Exerc*. juin 2002;34(6):1041-7.
 151. de Koning JJ, Bobbert MF, Foster C. Determination of optimal pacing strategy in track cycling with an energy flow model. *J Sci Med Sport*. 1 oct 1999;2(3):266-77.
 152. Foster C, Snyder AC, Thompson NN, Green MA, Foley M, Schrage M. Effect of pacing strategy on cycle time trial performance. *Med Sci Sports Exerc*. mars 1993;25(3):383-8.
 153. Hanon C, Leveque J-M, Thomas C, Vivier L. Pacing Strategy and V·O₂ Kinetics during a 1500-m Race. *Int J Sports Med*. mars 2008;29(3):206-11.
 154. Jones AM, Wilkerson DP, Vanhatalo A, Burnley M. Influence of pacing strategy on O₂

- uptake and exercise tolerance. *Scand J Med Sci Sports*. 2008;18(5):615-26.
155. Bailey SJ, Vanhatalo A, DiMenna FJ, Wilkerson DP, Jones AM. Fast-start strategy improves VO₂ kinetics and high-intensity exercise performance. *Med Sci Sports Exerc*. mars 2011;43(3):457-67.
 156. Ansley L, Lambert MI, Scharbort E, St Clair Gibson A, Noakes T. Regulation of pacing strategies during successive 4-km time trials. *Med Sci Sports Exerc*. oct 2004;36:1819-25.
 157. St Clair Gibson A, Schabort EJ, Noakes TD. Reduced neuromuscular activity and force generation during prolonged cycling. *Am J Physiol-Regul Integr Comp Physiol*. 1 juill 2001;281(1):R187-96.
 158. Foster C, deKoning JJ, Hettinga F, Lampen J, Dodge C, Bobbert M, et al. Effect of Competitive Distance on Energy Expenditure During Simulated Competition. *Int J Sports Med*. avr 2004;25(3):198-204.
 159. Garland SW. An analysis of the pacing strategy adopted by elite competitors in 2000 m rowing. *Br J Sports Med*. 1 janv 2005;39(1):39-42.
 160. Mayorga-Vega D, Bocanegra-Parrilla R, Ornelas M, Viciano J. Criterion-Related Validity of the Distance- and Time-Based Walk/Run Field Tests for Estimating Cardiorespiratory Fitness: A Systematic Review and Meta-Analysis. *PLOS ONE*. 17 mars 2016;11(3):e0151671.
 161. Burnley M, Doust JH, Vanhatalo A. A 3-min all-out test to determine peak oxygen uptake and the maximal steady state. *Med Sci Sports Exerc*. nov 2006;38(11):1995-2003.
 162. Vanhatalo A, Doust JH, Burnley M. Robustness of a 3 min all-out cycling test to manipulations of power profile and cadence in humans. *Exp Physiol*. 2008;93(3):383-90.
 163. Maron MB, Horvath SM, Wilkerson JE, Gliner JA. Oxygen uptake measurements during competitive marathon running. *J Appl Physiol*. 1 mai 1976;40(5):836-8.
 164. Billat V, Carbillet T, Correa M, Pycke J-R. Detecting the marathon asymmetry with a statistical signature. *Phys Stat Mech Its Appl*. 1 févr 2019;515:240-7.
 165. Foss ML, Keteyian S. J. *Fox's Physiological Basis for Exercise and Sport*, 6th éd. WCB/McGraw-Hill.; 1998.
 166. Weyand P, Curcton K, Conley D, Sloniger M. PERCENTAGE ANAEROBIC ENERGY UTILIZED DURING TRACK RUNNING EVENTS. *Med Sci Sports Exerc* [Internet]. mai 1993 [cité 28 août 2019];25(5). Disponible sur: insights.ovid.com
 167. McArdle WD, Katch FI, Katch VL. *Exercise physiology: energy, nutrition, and human performance*. Lea & Febiger. 1991;853.
 168. Medbo JJ, Mohn AC, Tabata I, Bahr R, Vaage O, Sejersted OM. Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. *J Appl Physiol*. 1 janv 1988;64(1):50-60.
 169. Gastin PB, Costill DL, Lawson DL, Krzeminski K, McConell GK. Accumulated oxygen deficit during supramaximal all-out and constant intensity exercise. *Med Sci Sports Exerc*. févr 1995;27(2):255-63.

170. Withers RT, Sherman WM, Clark DG, Esselbach PC, Nolan SR, Mackay MH, et al. Muscle metabolism during 30, 60 and 90 s of maximal cycling on an air-braked ergometer. *Eur J Appl Physiol.* 1 nov 1991;63(5):354-62.
171. Medbo JI, Tabata I. Relative importance of aerobic and anaerobic energy release during short-lasting exhausting bicycle exercise. *J Appl Physiol.* 1 nov 1989;67(5):1881-6.
172. Craig NP, Norton KI, Bourdon PC, Woolford SM, Stanef T, Squires B, et al. Aerobic and anaerobic indices contributing to track endurance cycling performance. *Eur J Appl Physiol.* 1 août 1993;67(2):150-8.
173. Spencer MR, Gastin PB. Energy system contribution during 200 to 1500 m running in highly trained athletes. In: *Medicine and Science in Sports and Exercise* 33. 2001. p. 157–162.
174. Gastin PB. Energy System Interaction and Relative Contribution During Maximal Exercise. *Sports Med.* 1 août 2001;31(10):725-41.
175. Duffield R, Dawson B, Goodman C. Energy system contribution to 100-m and 200-m track running events. *J Sci Med Sport.* 1 sept 2004;7(3):302-13.
176. Duffield R, Dawson B, Goodman C. Energy system contribution to 400-metre and 800-metre track running. *J Sports Sci.* 1 mars 2005;23(3):299-307.
177. Di Prampero PE. Energetics of muscular exercise. In: *Reviews of Physiology, Biochemistry and Pharmacology, Volume 89* [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1981 [cité 28 août 2019]. p. 143-222. (livres *Reviews of Physiology, Biochemistry and Pharmacology*). Disponible sur: <https://doi.org/10.1007/BFb0035266>
178. Ward-Smith AJ. A mathematical theory of running, based on the first law of thermodynamics, and its application to the performance of world-class athletes. *J Biomech.* 1 janv 1985;18(5):337-49.
179. Peronnet F, Thibault G. Mathematical analysis of running performance and world running records. *J Appl Physiol.* 1 juill 1989;67(1):453-65.
180. Cavagna GA, Komarek L, Mazzoleni S. The mechanics of sprint running. *J Physiol.* 1971;217(3):709-21.
181. Mero A, Komi PV, Gregor RJ. Biomechanics of Sprint Running. *Sports Med.* 1 juin 1992;13(6):376-92.
182. Arzac LM, Locatelli E. Modeling the energetics of 100-m running by using speed curves of world champions. *J Appl Physiol.* 1 mai 2002;92(5):1781-8.
183. Ward-Smith AJ, Radford PF. Investigation of the kinetics of anaerobic metabolism by analysis of the performance of elite sprinters. *J Biomech.* 1 août 2000;33(8):997-1004.
184. Duffield R, Dawson B, Goodman C. Energy system contribution to 1500- and 3000-metre track running. *J Sports Sci.* 1 oct 2005;23(10):993-1002.
185. MARGARIA R, MANGLLI F, CUTTICA F, CERRETELLI P. The Kinetics of the Oxygen Consumption at the Onset of Muscular Exercise in Man. *Ergonomics.* 1 janv 1965;8(1):49-54.

186. Draper SB, Wood DM. The $\dot{V}O_2$ response for an exhaustive treadmill run at 800-m pace: a breath-by-breath analysis. *Eur J Appl Physiol.* 1 janv 2005;93(4):381-9.
187. Spencer MR, Gastin PB, Payne W. Energy system contribution during 400 to 1500 metres running. *New Stud Athl.* 1 juill 1996;11:59-66.
188. Gajer B, Hanon C, Marajo J, Vollmer JC. Le 800 mètres: Analyse descriptive et entraînement: Fédération Française d'Athlétisme. INSEP (Institut national du sport et de l'éducation physique). 2001;
189. Hirvonen J, Nummela A, Rusko H, Rehunen S, Härkönen M. Fatigue and changes of ATP, creatine phosphate, and lactate during the 400-m sprint. *Can J Sport Sci J Can Sci Sport.* juin 1992;17(2):141-4.
190. Gaesser GA, Poole DC. The Slow Component of Oxygen Uptake Kinetics in Humans. *Exerc Sport Sci Rev.* janv 1996;24(1):35.
191. Poole DC, Richardson RS. Determinants of Oxygen Uptake. *Sports Med.* 1 nov 1997;24(5):308-20.
192. Thomas C, Hanon C, Perrey S, Chevalier J-ML, Couturier A, Vandewalle H. Oxygen Uptake Response to an 800-m Running Race. *Int J Sports Med.* mai 2005;26(4):268-73.
193. Tucker R, Lambert MI, Noakes TD. An Analysis of Pacing Strategies During Men's World-Record Performances in Track Athletics. *Int J Sports Physiol Perform.* 1 sept 2006;1(3):233-45.
194. Hanon C, Gajer B. Velocity and Stride Parameters of World-Class 400-Meter Athletes Compared With Less Experienced Runners. *J Strength Cond Res.* mars 2009;23(2):524–531.
195. Sjöstrand T. Changes in the Respiratory Organs of Workmen at an Ore Smelting Works1. *Acta Med Scand.* 1947;128(S196):687-99.
196. Astrand I. Aerobic work capacity in men and women with special reference to age. *Acta Physiol Scand Suppl.* 1960;49(169):1-92.
197. Strandell T. CIRCULATORY STUDIES ON HEALTHY OLD MEN. WITH SPECIAL REFERENCE TO THE LIMITATION OF THE MAXIMAL PHYSICAL WORKING CAPACITY. *Acta Med Scand Suppl.* 1964;414:SUPPL 414:1-44.
198. Ecrivez votre histoire sportive avec Decathlon Coach [Internet]. [cité 27 août 2019]. Disponible sur: /fr/home/advices/advice/les-zones-cardio
199. À quoi correspondent les zones cardio de couleur ? [Internet]. decathlonsav. 2018 [cité 27 août 2019]. Disponible sur: https://support.decathlon.fr/quoi-correspondent-les-zones-cardio-de-couleur-tp_43384
200. Figure out your training zones and supercharge your fitness [Internet]. Suunto. [cité 27 août 2019]. Disponible sur: <https://www.suunto.com/fr-fr/sports/News-Articles-container-page/Figure-out-your-training-zones-and-supercharge-your-fitness/>
201. Zuccarelli L, Porcelli S, Rasica L, Marzorati M, Grassi B. Comparison between Slow Components of HR and $\dot{V}O_2$ Kinetics: Functional Significance. *Med Sci Sports Exerc.*

- 2018;50(8):1649-57.
202. Lepretre P-M, Lopes P, Koralsztein J-P, Billat V. Fatigue responses in exercise under control of VO₂. *Int J Sports Med.* mars 2008;29(3):199-205.
 203. St Clair Gibson A, Lambert EV, Rauch LHG, Tucker R, Baden DA, Foster C, et al. The role of information processing between the brain and peripheral physiological systems in pacing and perception of effort. *Sports Med Auckl NZ.* 2006;36(8):705-22.
 204. Billat V, Hamard L, Koralsztein JP, Morton RH. Differential modeling of anaerobic and aerobic metabolism in the 800-m and 1,500-m run. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. août 2009;107(2):478-87.
 205. Hanon C, Thomas C. Effects of optimal pacing strategies for 400-, 800-, and 1500-m races on the [Vdot]O₂ response. *J Sports Sci.* 1 juin 2011;29(9):905-12.
 206. Fukuba Y, Whipp BJ. A metabolic limit on the ability to make up for lost time in endurance events. *J Appl Physiol.* 1 août 1999;87(2):853-61.
 207. Noakes TD. Physiological models to understand exercise fatigue and the adaptations that predict or enhance athletic performance. *Scand J Med Sci Sports.* 2000;10(3):123-45.
 208. Noakes TD, St Clair Gibson A. Logical limitations to the « catastrophe » models of fatigue during exercise in humans. *Br J Sports Med.* oct 2004;38(5):648-9.
 209. Lambert EV, Gibson ASC, Noakes TD. Complex systems model of fatigue: integrative homeostatic control of peripheral physiological systems during exercise in humans. *Br J Sports Med.* 1 janv 2005;39(1):52-62.
 210. Baron B, Grappe F, Gros Lambert A. The Global Model of Pacing Process for Long and Ultra-Long Distance. *Psychology.* 18 déc 2018;9(14):2837-50.
 211. Marcora SM, Staiano W, Manning V. Mental fatigue impairs physical performance in humans. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. mars 2009;106(3):857-64.
 212. de Koning JJ, Foster C, Bakkum A, Kloppenburg S, Thiel C, Joseph T, et al. Regulation of Pacing Strategy during Athletic Competition. *PLoS ONE [Internet].* 20 janv 2011 [cité 28 août 2019];6(1). Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3024328/>
 213. Lander PJ, Butterly RJ, Edwards AM. Self-paced exercise is less physically challenging than enforced constant pace exercise of the same intensity: influence of complex central metabolic control. *Br J Sports Med.* oct 2009;43(10):789-95.
 214. Hettinga FJ, Koning JJ de, Broersen FT, Geffen P van, Foster CG. Pacing strategy and the occurrence of fatigue in 4000-m cycling time trials. *Med Sci Sports Exerc.* 2006;38(8):1484-91.
 215. Noakes TD. The Central Governor Model of Exercise Regulation Applied to the Marathon. *Sports Med.* 1 avr 2007;37(4):374-7.
 216. Kayser B. Exercise starts and ends in the brain. *Eur J Appl Physiol.* 1 oct 2003;90(3):411-9.

217. Pageaux B. Central and peripheral manipulations of perceived exertion and endurance performance [Internet] [phd]. University of Kent,; 2014 [cité 13 sept 2019]. Disponible sur: <https://kar.kent.ac.uk/47714/>
218. Pageaux B, Lepers R, Dietz KC, Marcora SM. Response inhibition impairs subsequent self-paced endurance performance. *Eur J Appl Physiol*. 1 mai 2014;114(5):1095-105.
219. Borg GA. Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc*. 1982;14(5):377-81.
220. Garcin M, Vandewalle H, Monod H. A New Rating Scale of Perceived Exertion Based on Subjective Estimation of Exhaustion Time: A Preliminary Study. *Int J Sports Med*. janv 1999;20(1):40-3.
221. Garcin M, Billat V. Les échelles d'effort perçues témoignent à la fois de l'intensité et de la durée de l'exercice. *Percept Mot Skills*. 1 déc 2001;93(3):661-71.
222. Coquart JBJ, Garcin M. Validité et fiabilité des balances basées sur la perception lors de courses épuisantes chez des coureurs masculins entraînés. *Percept Mot Skills*. 1 févr 2007;104(1):254-66.
223. Coquart JBJ, Dufour Y, Gros Lambert A, Matran R, Garcin M. Relationships Between Psychological Factors, RPE and Time Limit Estimated by Teleoanticipation. *Sport Psychol*. 1 sept 2012;26(3):359-74.
224. Eston RG, Lamb KL, Parfitt G, King N. The validity of predicting maximal oxygen uptake from a perceptually-regulated graded exercise test. *Eur J Appl Physiol*. juin 2005;94(3):221-7.
225. Eston RG, Faulkner JA, Mason EA, Parfitt G. The validity of predicting maximal oxygen uptake from perceptually regulated graded exercise tests of different durations. *Eur J Appl Physiol*. juill 2006;97(5):535-41.
226. Eston R, Lambrick D, Sheppard K, Parfitt G. Prediction of maximal oxygen uptake in sedentary males from a perceptually regulated, sub-maximal graded exercise test. *J Sports Sci*. 15 janv 2008;26(2):131-9.
227. Faulkner J, Parfitt G, Eston R. Prediction of maximal oxygen uptake from the ratings of perceived exertion and heart rate during a perceptually-regulated sub-maximal exercise test in active and sedentary participants. *Eur J Appl Physiol*. oct 2007;101(3):397-407.
228. Eston R. Use of ratings of perceived exertion in sports. *Int J Sports Physiol Perform*. juin 2012;7(2):175-82.
229. Noakes TD. Testing for maximum oxygen consumption has produced a brainless model of human exercise performance. *Br J Sports Med*. juill 2008;42(7):551-5.
230. Mauger AR, Sculthorpe N. A new VO₂max protocol allowing self-pacing in maximal incremental exercise. *Br J Sports Med*. 1 janv 2012;46(1):59-63.
231. Mauger AR, Metcalfe AJ, Taylor L, Castle PC. The efficacy of the self-paced VO₂max test to measure maximal oxygen uptake in treadmill running. *Appl Physiol Nutr Metab*. 6 juin 2013;38(12):1211-6.

232. Sheadler CM, Devor ST. VO₂max Measured with a Self-selected Work Rate Protocol on an Automated Treadmill. *Med Sci Sports Exerc.* oct 2015;47(10):2158-65.
233. Hanson NJ, Sheadler CM, Lee TL, Neuenfeldt NC, Michael TJ, Miller MG. Modality determines VO₂max achieved in self-paced exercise tests: validation with the Bruce protocol. *Eur J Appl Physiol.* 1 juill 2016;116(7):1313-9.
234. Truong P, Millet GP, Gojanovic B. Perceptually regulated exercise test allows determination of VO₂max and ventilatory threshold. *Int J Sports Med* [Internet]. [cité 28 août 2019]; Disponible sur: https://serval.unil.ch/notice/serval:BIB_7855B6B35D58
235. Beltz NM, Amorim FT, Gibson AL, Janot JM, Kravitz L, Mermier CM, et al. Hemodynamic and metabolic responses to self-paced and ramp-graded exercise testing protocols. *Appl Physiol Nutr Metab.* 15 janv 2018;43(6):609-16.
236. Hogg JS, Hopker JG, Mauger AR. The Self-Paced VO₂max Test to Assess Maximal Oxygen Uptake in Highly Trained Runners. *Int J Sports Physiol Perform.* 1 mars 2015;10(2):172-7.
237. Hopker JG, Coleman DA, Wiles JD, Galbraith A. Familiarisation and Reliability of Sprint Test Indices During Laboratory and Field Assessment. *J Sports Sci Med.* 1 déc 2009;8(4):528-32.
238. Lim W, Lambrick D, Mauger A, Woolley B, Faulkner J. The effect of trial familiarisation on the validity and reproducibility of a field-based self-paced VO₂max test. *Biol Sport.* sept 2016;33(3):269-75.
239. Smith AE, Eston RG, Norton B, Parfitt G. A Perceptually-regulated Exercise Test Predicts Peak Oxygen Uptake in Older Active Adults. *J Aging Phys Act.* 1 avr 2015;23(2):205-11.
240. Marcora SM. Effort: perception of. In: Goldstein EB, éditeur. *Encyclopedia of Perception* [Internet]. Los Angeles: Sage; 2010 [cité 28 août 2019]. p. 380-3. Disponible sur: <http://www.uk.sagepub.com/books/Book229708>
241. Marcora S. Counterpoint: Afferent Feedback From Fatigued Locomotor Muscles Is Not An Important Determinant Of Endurance Exercise Performance. *J Appl Physiol.* 1 févr 2010;108(2):454-6.
242. Amann M, Hopkins W, Marcora S. Similar Sensitivity of Time to Exhaustion and Time-Trial Time to Changes in Endurance. *Med Sci Sports Exerc.* mars 2008;40(3):574-8.
243. Renfree A, Martin L, Micklewright D, St Clair Gibson A. Application of Decision-Making Theory to the Regulation of Muscular Work Rate during Self-Paced Competitive Endurance Activity. *Sports Med.* 1 févr 2014;44(2):147-58.
244. Carbillet T. Monitoring en temps réel de la vitesse de déplacement sur dispositif connecté : modélisation mathématique sur plateforme mobile interfacée avec une base de données d'entraînement et d'audit physiologique. 12 avr 2019 [cité 27 août 2019]; Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02269138>
245. Hill DW. Determination of Accumulated O₂ Deficit in Exhaustive Short-Duration Exercise. *Can J Appl Physiol.* 1 févr 1996;21(1):63-74.

246. Hill DW, Ferguson CS, Ehler KL. An alternative method to determine maximal accumulated O₂ deficit in runners. *Eur J Appl Physiol.* 1 nov 1998;79(1):114-7.
247. Boudet G, Albuissou E, Bedu M, Chamoux A. Heart Rate Running Speed Relationships During Exhaustive Bouts in the Laboratory. *Can J Appl Physiol.* 1 déc 2004;29(6):731-42.
248. Agresti A. *Analysis of Ordinal Categorical Data.* John Wiley & Sons; 2010. 419 p.
249. Kendall MG. A New Measure of Rank Correlation. *Biometrika.* 1938;30(1/2):81-93.
250. Ledermann S, Kendall M. G. et Stuart A. — *The Advanced Theory of Statistics. Population.* 1963;18(2):396-396.
251. Lion S. Analyse multi-satellite et multi-échelle de la turbulence dans le vent solaire. 26 sept 2016 [cité 28 août 2019]; Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01478328>
252. Issekutz B, Birkhead NC, Rodahl K. Use of respiratory quotients in assessment of aerobic work capacity. *J Appl Physiol.* 1 janv 1962;17(1):47-50.
253. Gordon D, Caddy O, Merzbach V, Gernigon M, Baker J, Scruton A, et al. Prior Knowledge of Trial Number Influences the Incidence of Plateau at VO₂max. *J Sports Sci Med.* 27 janv 2015;14(1):47-53.
254. Cumming GR, Borysyk LM. Criteria for maximum oxygen uptake in men over 40 in a population survey. *Med Sci Sports.* 1972;4(1):18-22.
255. Stachenfeld NS, Eskenazi M, Gleim GW, Coplan NL, Nicholas JA. Predictive accuracy of criteria used to assess maximal oxygen consumption. *Am Heart J.* avr 1992;123(4 Pt 1):922-5.
256. Duncan GE, Howley ET, Johnson BN. Applicability of VO₂max criteria: discontinuous versus continuous protocols. *Med Sci Sports Exerc.* févr 1997;29(2):273-8.
257. Wagner PD. New ideas on limitations to VO₂max. *Exerc Sport Sci Rev.* janv 2000;28(1):10-4.
258. Doherty M, Nobbs L, Noakes TD. Low frequency of the « plateau phenomenon » during maximal exercise in elite British athletes. *Eur J Appl Physiol.* 1 août 2003;89(6):619-23.
259. Astorino TA. Alterations in VO₂max and the VO₂ plateau with manipulation of sampling interval. *Clin Physiol Funct Imaging.* 2009;29(1):60-7.
260. Gordon D, Hopkins S, King C, Keiller D, Barnes RJ. Incidence of the Plateau at VO₂max is Dependent on the Anaerobic Capacity. *Int J Sports Med.* janv 2011;32(1):1-6.
261. Lucía A, Rabadán M, Hoyos J, Hernández-Capilla M, Pérez M, Juan AFS, et al. Frequency of the VO₂max Plateau Phenomenon in World-Class Cyclists. *Int J Sports Med.* déc 2006;27(12):984-92.
262. Thoden JS. Evaluation of the aerobic power. *Physiological testing of the high-performance athlete. Human Kinetics.* 1991;
263. Astorino TA, White AC, Dalleck LC. Supramaximal testing to confirm attainment of VO₂max in sedentary men and women. *Int J Sports Med.* avr 2009;30(4):279-84.

264. Astorino TA, White AC. Assessment of anaerobic power to verify VO₂max attainment. *Clin Physiol Funct Imaging*. 2010;30(4):294-300.
265. Wasserman K, Van Kessel AL, Burton GG. Interaction of physiological mechanisms during exercise. *J Appl Physiol*. 1 janv 1967;22(1):71-85.
266. Wasserman K, McIlroy MB. Detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise. *Am J Cardiol*. 1 déc 1964;14(6):844-52.
267. Karlsson J, Jacobs I. Onset of blood lactate accumulation during muscular exercise as a threshold concept. I. Theoretical considerations. *Int J Sports Med*. nov 1982;3(4):190-201.
268. Jorfeldt L. Metabolism of L(+)-lactate in human skeletal muscle during exercise. *Acta Physiol Scand Suppl* 338. 1970;
269. Green HJ, Hughson RL, Orr GW, Ranney DA. Anaerobic threshold, blood lactate, and muscle metabolites in progressive exercise. *J Appl Physiol*. 1 avr 1983;54(4):1032-8.
270. Kindermann W, Simon G, Keul J. The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training. *Eur J Appl Physiol*. 1 sept 1979;42(1):25-34.
271. Cheng B, Kuipers H, Snyder AC, Keizer HA, Jeukendrup A, Hesselink M. A New Approach for the Determination of Ventilatory and Lactate Thresholds. *Int J Sports Med*. oct 1992;13(7):518-22.
272. Lundberg MA, Hughson RL, Weisiger KH, Jones RH, Swanson GD. Computerized estimation of lactate threshold. *Comput Biomed Res*. 1 oct 1986;19(5):481-6.
273. Aunola S, Rusko H. Does anaerobic threshold correlate with maximal lactate steady-state? *J Sports Sci*. 1 août 1992;10(4):309-23.
274. Anderson O. *Running Science. Human Kinetics*; 2013. 610 p.
275. Billat V, Bernard O, Pinoteau J, Petit B, Koralsztein JP. Time to exhaustion at VO₂max and lactate steady state velocity in sub elite long-distance runners. *Arch Int Physiol Biochim Biophys*. juin 1994;102(3):215-9.
276. Midgley AW, McNaughton LR, Wilkinson M. Is there an optimal training intensity for enhancing the maximal oxygen uptake of distance runners?: empirical research findings, current opinions, physiological rationale and practical recommendations. *Sports Med Auckl NZ*. 2006;36(2):117-32.
277. Joyner MJ, Coyle EF. Endurance exercise performance: the physiology of champions. *J Physiol*. 2008;586(1):35-44.
278. Tanaka K, Matsuura Y, Matsuzaka A, Hirakoba K, Kumagai S, Sun SO, et al. A longitudinal assessment of anaerobic threshold and distance-running performance. *Med Sci Sports Exerc*. juin 1984;16(3):278-82.
279. Jacobs I. Blood Lactate. *Sports Med*. 1 janv 1986;3(1):10-25.
280. Martin DE, Vroon DH, May DF, Pilbeam SP. Physiological Changes in Elite Male Distance Runners Training for Olympic Competition. *Phys Sportsmed*. 1 janv

- 1986;14(1):152-206.
281. Gaesser GA, Brooks GA. Muscular efficiency during steady-rate exercise: effects of speed and work rate. *J Appl Physiol.* juin 1975;38(6):1132-9.
282. Pollock ML. Submaximal and Maximal Working Capacity of Elite Distance Runners. Part I: Cardiorespiratory Aspects*. *Ann N Y Acad Sci.* 1977;301(1):310-22.
283. Lucia A, Oliván J, Bravo J, Gonzalez-Freire M, Foster C. The key to top-level endurance running performance: a unique example. *Br J Sports Med.* 1 mars 2008;42(3):172-4.
284. Brue F. Une variante du test progressif et maximal de Léger-Boucher : le test de VMA derrière cycliste (test VMA). In Toulouse; 1985.
285. Astrand PO, Rodahl K. Textbook of work physiology: Physiological bases of exercise. In: 3rd Edition. McGraw-Hill; 1986.
286. Mathews DK, Fox EL. The physiological basis of physical education and athletics. Philadelphia: Saunders; 1971. 241 p.
287. Tokmakidis S, Bogdanis G, Mougios V, Chasiotis D. Interaction between aerobic and anaerobic metabolism during competitive effort. *Exerc Soc J Sport Sci.* 2000;(26):5-26.
288. Hanon C, Lepretre P-M, Bishop D, Thomas C. Oxygen uptake and blood metabolic responses to a 400-m run. *Eur J Appl Physiol.* mai 2010;109(2):233-40.
289. Draper SB, Wood DM, Fallowfield JL. The $\dot{V}O_2$ response to exhaustive square wave exercise: influence of exercise intensity and mode. *Eur J Appl Physiol.* 1 sept 2003;90(1):92-9.
290. Léger L, Mercier D, Gauvin L. The relationship between % $\dot{V}O_{2max}$ and running performance time. *Sport Elite Perform IL Hum Kinet.* 1986;(113):20.
291. Lacour JR, Padilla-Magunacelaya S, Barthélémy JC, Dormois D. The energetics of middle-distance running. *Eur J Appl Physiol.* 1 janv 1990;60(1):38-43.
292. Morton RH, Billat V. Maximal endurance time at $\dot{V}O_{2max}$. *Med Sci Sports Exerc.* août 2000;32(8):1496-504.
293. Zoladz JA, Duda K, Majerczak J. Oxygen uptake does not increase linearly at high power outputs during incremental exercise test in humans. *Eur J Appl Physiol.* 1 mars 1998;77(5):445-51.
294. Caputo F, Denadai BS. The highest intensity and the shortest duration permitting attainment of maximal oxygen uptake during cycling: effects of different methods and aerobic fitness level. *Eur J Appl Physiol.* 1 mai 2008;103(1):47-57.
295. Yano T, Yunoki T, Horiuchi M. Kinetics of oxygen uptake during decremental ramp exercise. *J Sports Med Phys Fitness.* mars 2000;40(1):11-6.
296. Demarie S, Koralsztejn JP, Billat V. Time limit and time at $\dot{V}O_{2max}$ during a continuous and an intermittent run. *J Sports Med Phys Fitness.* juin 2000;40(2):96-102.
297. di Prampero PE. The concept of critical velocity: a brief analysis. *Eur J Appl Physiol.* 1

- juin 1999;80(2):162-4.
298. Hagberg JM, Mullin JP, Nagle FJ. Oxygen consumption during constant-load exercise. *J Appl Physiol.* sept 1978;45(3):381-4.
 299. Tucker R, Marle T, Lambert EV, Noakes TD. The rate of heat storage mediates an anticipatory reduction in exercise intensity during cycling at a fixed rating of perceived exertion. *J Physiol.* 1 août 2006;574(Pt 3):905-15.
 300. Gibson ASC, Baden DA, Lambert MI, Lambert EV, Harley YXR, Hampson D, et al. The Conscious Perception of the Sensation of Fatigue. *Sports Med.* 1 mars 2003;33(3):167-76.
 301. Nolan PB, Beaven ML, Dalleck L. Comparison of Intensities and Rest Periods for VO₂max Verification Testing Procedures. *Int J Sports Med.* nov 2014;35(12):1024-9.
 302. Poole DC, Jones AM. Measurement of the maximum oxygen uptake $\dot{V}O_{2max}$: $\dot{V}O_{2peak}$ is no longer acceptable. *J Appl Physiol.* avr 2017;122(4):997-1002.
 303. Foster C, Hendrickson KJ, Peyer K, Reiner B, deKoning JJ, Lucia A, et al. Pattern of developing the performance template. *Br J Sports Med.* 15 sept 2009;43(10):765-9.
 304. Hanson NJ, Reid CR, Cornwell KM, Lee TL, Scheadler CM. Pacing strategy during the final stage of a self-paced $\dot{V}O_{2max}$ (SPV) test does not affect maximal oxygen uptake. *Eur J Appl Physiol.* sept 2017;117(9):1807-15.
 305. Hutchinson MJ, Paulson TAW, Eston R, Goosey-Tolfrey VL. Assessment of peak oxygen uptake during handcycling: Test-retest reliability and comparison of a ramp-incremented and perceptually-regulated exercise test. *PLoS ONE [Internet].* 13 juill 2017;12(7). Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5509239/>
 306. Jenkins LA, Mauger A, Fisher J, Hopker J. Reliability and Validity of a Self-paced Cardiopulmonary Exercise Test in Post-MI Patients. *Int J Sports Med.* avr 2017;38(4):300-6.
 307. Chidnok W, Dimenna FJ, Bailey SJ, Burnley M, Wilkerson DP, Vanhatalo A, et al. VO₂max is not altered by self-pacing during incremental exercise. *Eur J Appl Physiol.* févr 2013;113(2):529-39.
 308. Chidnok W, Dimenna FJ, Bailey SJ, Burnley M, Wilkerson DP, Vanhatalo A, et al. VO₂max is not altered by self-pacing during incremental exercise: reply to the letter of Alexis R. Mauger. *Eur J Appl Physiol.* févr 2013;113(2):543-4.
 309. Poole DC, Barstow TJ, McDonough P, Jones AM. Control of oxygen uptake during exercise. *Med Sci Sports Exerc.* mars 2008;40(3):462-74.
 310. Barstow TJ, Mole PA. Linear and nonlinear characteristics of oxygen uptake kinetics during heavy exercise. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. déc 1991;71(6):2099-106.
 311. Noakes TD, Gibson ASC, Lambert EV. From catastrophe to complexity: a novel model of integrative central neural regulation of effort and fatigue during exercise in humans: summary and conclusions. *Br J Sports Med.* 1 févr 2005;39(2):120-4.
 312. Baden DA, McLean TL, Tucker R, Noakes TD, Gibson ASC. Effect of anticipation during unknown or unexpected exercise duration on rating of perceived exertion, affect, and

- physiological function. *Br J Sports Med.* 1 oct 2005;39(10):742-6.
313. Tucker R. The anticipatory regulation of performance: the physiological basis for pacing strategies and the development of a perception-based model for exercise performance. *Br J Sports Med.* 1 juin 2009;43(6):392-400.
314. Hampson DB, Gibson ASC, Lambert MI, Dugas JP, Lambert EV, Noakes TD. Déception et effort perçu lors de courses à haute intensité. *Percept Mot Skills.* 1 juin 2004;98(3):1027-38.
315. Skinner J, Hutsler R, Bergsteinova V, Buskirk E. Perception of effort during different types of exercise and under different environmental conditions. *Med Sci Sports.* juill 1973;5(2):110-5.
316. Noble B, Metz K, Pandolf K, Cafarelli E. Perceptual responses to exercise: a multiple regression study. *Med Sci Sports.* juill 1973;5(2):104-9.
317. Noakes TD, Marino FE. Point: maximal oxygen uptake is limited by a central nervous system governor. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. janv 2009;106(1):338-9; discussion 341.
318. Nybo L, Rasmussen P. Inadequate cerebral oxygen delivery and central fatigue during strenuous exercise. *Exerc Sport Sci Rev.* juill 2007;35(3):110-8.
319. Billaut F, Davis JM, Smith KJ, Marino FE, Noakes TD. Cerebral oxygenation decreases but does not impair performance during self-paced, strenuous exercise. *Acta Physiol.* 2010;198(4):477-86.
320. Tucker R, Rauch L, Harley YXR, Noakes TD. Impaired exercise performance in the heat is associated with an anticipatory reduction in skeletal muscle recruitment. *Pflug Arch.* 1 juill 2004;448(4):422-30.

Titre : Influence des variables de contrôle sur l'émergence des paradigmes physiologiques de la performance en course à pied

Mots clés : Physiologie de l'exercice, $\dot{V}O_{2max}$, Perception de l'effort.

Résumé : Cette thèse avait pour ambition de contribuer à la compréhension des effets des variables de contrôle sur la performance, que sont le temps, la vitesse, la perception de l'effort (article 1), la distance (article 2) ainsi que $\dot{V}O_2$ et la fréquence cardiaque (article 3). Nous avons pu réaliser ce travail en utilisant les nouvelles possibilités qu'offrent les nouvelles technologies affranchissant le physiologiste du tapis roulant tout en disposant de la possibilité de contrôler par Bluetooth® toutes les variables physiologiques. Nous avons mis en évidence que : 1) les athlètes étaient capables d'adapter et de reproduire des réponses physiologiques non seulement en intensité mais en durée (article 1), 2) lorsque la variable de contrôle est la distance avec une mise en situation de compétition, la contribution de l'énergie à $\dot{V}O_{2max}$ était relativement identique en proportion de l'énergie aérobie et ce, du 100 au 10,000 m (article 2). Il y aurait donc un continuum énergétique allant du sprint au 10 kilomètres qui pourrait être une information intégrée dans l'organisme de façon centrale (demi-fond et fond) ou métabolique (sprint), 3) Enfin, nous avons montré que même dans un effort assez long (12 minutes) et maximal, le coureur tirait bénéfice d'une aide de contrôle « physiologique » par la fréquence cardiaque ou $\dot{V}O_2$ pour parvenir à sa meilleure performance. En conclusion, ce travail de thèse propose une méthodologie dans laquelle le coureur devient autonome dans le choix de sa stratégie de vitesse en s'affranchissant des calculs de vitesse cible à partir des seuils physiologiques, $\dot{V}O_{2max}$ et autres facteurs physiologiques rendus limitants en cela.

Title : Influence of control variables on the emergence of physiological paradigms of running performance

Keywords : Exercise physiology, $\dot{V}O_{2max}$, perceived exertion

Abstract : The aim of this thesis was to contribute to the understanding of the effects of control variables on performance, such as time, speed, perception of effort (article 1), distance (article 2) as well as $\dot{V}O_2$ and heart rate (article 3). We were able to do this work using the new possibilities offered by the new technologies that free the physiologist from the treadmill while having the possibility of controlling all physiological variables via Bluetooth®. We found that: 1) athletes were able to adapt and reproduce physiological responses not only in intensity but also in duration (article 1), 2) when the control variable is distance with a competitive situation, the contribution of energy at $\dot{V}O_{2max}$ was relatively identical in proportion to aerobic energy from 100 to 10,000m (article 2). There would therefore be an energy continuum from sprint to 10 kilometres that could be information integrated into the body in a central (middle and bottom) or metabolic (sprint) way. Finally, we have shown that even in a fairly long (12 minutes) and maximum effort, the runner benefits from a "physiological" control aid by heart rate or $\dot{V}O_2$ to achieve his best performance. In conclusion, this thesis work proposes a methodology in which the runner becomes autonomous in the choice of his speed strategy by freeing himself from target speed calculations based on physiological thresholds, $\dot{V}O_{2max}$ and other physiological factors made limiting .