

Comparaison de méthodes de prédiction pour des performances en course de montagne

Travail de fin d'études en vue de l'obtention du titre de
Master of Science en sciences du sport
Option enseignement

déposé par

Jérôme Crettaz

à

l'Université de Fribourg, Suisse
Faculté des sciences et de médecine
Section Médecine
Département des neurosciences et sciences du mouvement

en collaboration avec la
Haute école fédérale de sport de Macolin

Référent

Prof. Jean-Pierre Bresciani

Conseillers

Maître SSM Alain Rouvenaz

Maître assistant Thibaut Le Naour

Anniviers, août 2019

Table des matières

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Introduction | 5 |
| 1.1 | Performance : un long processus d'entraînement | 6 |
| 1.2 | Catégorisation des courses de montagne | 7 |
| 1.3 | Adaptations physiologiques à l'effort | 10 |
| 1.4 | Consommation maximale d'oxygène | 13 |
| 1.5 | Mesurer sa $VO_2\text{max}$ | 18 |
| 1.6 | Objectif du travail | 22 |
| 1.7 | Questions de recherche | 23 |
| 1.8 | Hypothèses | 23 |
| 2 | Méthode | 24 |
| 2.1 | Description de l'échantillon | 24 |
| 2.2 | Design de l'étude | 25 |
| 2.3 | Description détaillée des méthodes | 25 |
| 2.4 | Instruments de recherche | 27 |
| 2.5 | Interventions | 29 |
| 3 | Résultats | 30 |
| 3.1 | Validité des expérimentations | 30 |
| 3.2 | Prédiction par la distance équivalente à plat | 31 |
| 3.3 | Explication du temps de course à partir de la $VO_2\text{max}$ | 33 |
| 3.4 | Relation entre vitesse ascensionnelle du test et de la course | 34 |
| 3.5 | Explication du temps de course par la vitesse ascensionnelle de la course | 35 |
| 3.6 | Explication du temps de course à partir de la vitesse ascensionnelle du test | 35 |
| 3.7 | Explication du temps de course à partir de la vitesse ascensionnelle de la course et de la $VO_2\text{max}$ | 36 |
| 4 | Discussion | 39 |
| 4.1 | Validité des expérimentations | 39 |
| 4.2 | Prédiction de performance | 39 |
| 4.3 | Relation entre les performances de la course et du test | 40 |
| 4.4 | Réponse à la question de recherche | 42 |
| 4.5 | Forces et limites de l'étude | 43 |
| 5 | Conclusion | 45 |
| | Bibliographie | 47 |

| | |
|---------------------|----|
| Annexe | 51 |
| Remerciements | 56 |

Résumé

Introduction. Prédire ses performances en course à pied est un moyen de mesurer son état de forme actuel et de cibler ses objectifs. Les physiologistes du sport proposent diverses équations de prédiction basées sur des paramètres tels que la consommation maximale d'oxygène (VO_{2max}) ou la vitesse ascensionnelle (VA) afin d'estimer son temps sur différentes distances. Cependant pour les courses de montagne, la littérature se fait plus discrète. Peu de moyens sont avancés pour prédire un résultat sur les parcours présentant du dénivelé.

Objectif. Dans cette étude, nous essayons de proposer un modèle de prédiction pour un parcours de course de montagne. Il est établi sur la base d'un test d'effort spécifique à cette discipline et d'un calcul d'équivalence à plat du tracé. Ainsi, nous proposons un modèle de prédiction individualisé pour chacun des sujets afin d'estimer leur future performance.

Méthode. Nos recherches se sont basées sur un échantillon de 12 sujets. Ces derniers ont participé au test en laboratoire afin d'obtenir différentes données physiologiques utiles à la prédiction. Par la suite, ils ont effectué la course sélectionnée afin de confirmer ou non les estimations. Enfin, nous avons comparé les résultats et mesuré les marges d'erreurs afin de pouvoir adapter nos prédictions et proposer une nouvelle modélisation étalonnée.

Résultats. Les résultats ont démontré de bonnes prédictions pour les méthodes d'équivalence à plat. Pour la première, l'erreur relative était de 3.51% et pour la seconde 6.28%. Pour les modèles établis après étalonnage, la qualité de la prédiction était forte pour toutes les prédictions: le temps de course avec la VO_{2max} : $R^2 = 0.92$; la VA du test avec la VA de course : R^2 de 0.99 ; le temps de course avec la VA du test : $R^2 = 0.86$. Quant à la meilleure prédiction de l'étude, elle provient d'une modélisation 3D prenant en compte deux variables indépendantes : la VO_{2max} et la VA de course avec un R^2 de 0.97.

Discussion. Les résultats prédis par la méthode d'équivalence à plat offre un bon moyen d'estimation personnalisée. Quant aux modèles créés avec les données spécifiques à la course, ils donnent davantage de précision des prédictions. La meilleure des estimations de performance testées dans cette étude revient au modèle qui rassemble le plus de variables indépendantes dans son équation.

Conclusion. Les prédictions de performance en course de montagne ne peuvent avoir des résultats significatifs uniquement par la personnalisation d'un modèle car les nombreux facteurs de performance non-quantifiables et spécifiques à chacun des parcours ne permettent pas la création d'une modélisation générale.

1 Introduction

De nos jours, la course à pied est une discipline sportive en plein essor. En 2013, le calendrier suisse des courses à pied recensait plus de 700 compétitions pour un nombre total de participants estimé à 400'000 alors qu'en 1980, seule une cinquantaine de courses avait lieu (Mariani, 2014). Le peu de ressources matérielles nécessaires à sa pratique et ses bienfaits pour la santé séduisent de nombreux adeptes. Les diverses disciplines de la course offrent la possibilité aux plus compétitifs de se mesurer et aux amateurs de participer aux épreuves populaires où la satisfaction de rallier l'arrivée passe avant le chronomètre. Chaque athlète sait que la progression des performances passe obligatoirement par l'entraînement et l'augmentation globale de sa charge. Néanmoins, les performances des athlètes ne reposent pas uniquement sur le volume d'entraînement (quantité) mais aussi sur son intensité (qualité).

Dans ce travail, nous nous intéressons au côté physiologique de cette discipline d'endurance dont les performances dépendent de nombreux paramètres dont la force, la coordination et l'endurance de base. Nous traiterons plus spécifiquement de la course à pied de montagne. Ce sport d'endurance est défini par le scientifique du sport Jürgen Weineck comme la capacité psychophysique d'un athlète à résister à la fatigue (Weineck, 1996). Une planification cohérente des entraînements en course à pied repose sur la connaissance des caractéristiques de la discipline, du niveau de performance de l'athlète, de son potentiel, et des moyens dont il dispose. A partir de là, les objectifs peuvent être fixés et la planification élaborée.

Pour poser un diagnostic sur le niveau de performance de l'athlète, il existe des tests permettant de mesurer ses propres performances à l'instar de sa vitesse maximale aérobie (VMA) qui s'exprime en kilomètres par heure, de sa consommation maximale d'oxygène ($VO_2\text{max}$), de sa fréquence cardiaque maximale (FCmax), son indice d'endurance. Qu'ils soient réalisés en terrain ou en laboratoire, ils nous permettront d'évaluer l'état de performance actuel et de prédire de futures performances de l'athlète. Ce test sera l'un des éléments nécessaires à l'élaboration d'un programme d'entraînement sur mesure (Sordello, 2015).

Lorsque qu'il s'agit de tests en course à pied de montagne, les articles se font plus rares et peu de tests spécifiques, tels que la VMA ascensionnelle, sont proposés. Il existe néanmoins des études qui démontrent différentes corrélations entre les courses à plat et celles de montagne (Lacroix, 2018a).

1.1 Performance : un long processus d'entraînement

Les définitions que proposent les scientifiques du sport à propos des termes performance et entraînement démontrent des relations intéressantes entre ces deux notions. Erich Beyer et Francis Trilles en sont la preuve. Le premier d'entre eux définit l'entraînement comme un « processus d'action complexe dont le but est d'agir de façon méthodique et adaptée sur le développement de la performance sportive » (Beyer, 1992, p.770). Quant à Trilles (2002), il définit la performance comme un « aboutissement (...) d'une série d'actions appelées préparation sportive. Elle constitue l'objectif d'un long processus d'entraînement » (p.13).

Le lien entre ces deux notions est mesurable par le résultat ou estimé par la prédiction de résultats. Cette relation laisse penser que plus un athlète s'entraîne, meilleur il sera. Cependant, elle n'est pas aussi simple que cela. Les chercheurs Morin, Ahmaïdi & Leprêtre (2014) démontrent toute la complexité d'une modélisation permettant un rapport entre entraînement et performance. Les effets engendrés par les entraînements ne permettent pas de prédire avec précision les performances des sportifs, encore moins chez les professionnels. Ainsi, la modélisation des effets de l'entraînement servirait comme une aide à la planification.

Pour les adeptes de course à pied, il est logique que les performances dépendent de l'entraînement. Néanmoins, les progrès ne reposent pas uniquement sur le volume mais également sur son intensité. Ainsi, l'optimisation des résultats s'appuie sur plusieurs piliers, plus ou moins importants, selon les disciplines. En course de montagne, ils peuvent être classés en trois piliers : physiologique, biomécanique et psychologique (Cazorla, 2014).

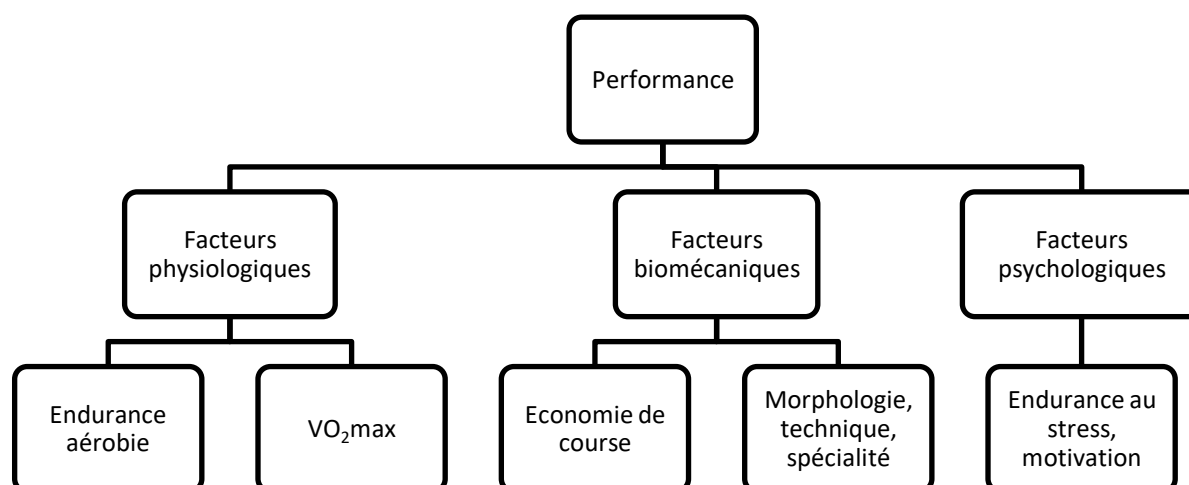


Figure 1. La performance (Cazorla, 2014, p.3).

Une connaissance de soi, tant au niveau physique que psychologique, et des spécificités de la discipline permettra un entraînement ciblé afin de supprimer d'éventuels déficits au sein des

trois piliers et ainsi permettre une meilleure progression des performances en course à pied. Dans ce travail, nous nous intéressons à la discipline de la course de montagne. Dans le prochain sous-chapitre, nous tenterons d'en définir les caractéristiques.

1.2 Catégorisation des courses de montagne

Dans le milieu de la course à pied, il existe un large éventail de disciplines. L'offre des compétitions à plat comprend les courses sur stade : le sprint, les courtes distances (le demi-fond et de fond) et les courses hors stade : les courses sur route (du 10 kilomètres au marathon) et les courses de cross-country. Au sein des courses de montagne (également classées course hors stade), il existe également plusieurs catégorisations en fonction du dénivelé et de la distance. Chaque pays possède sa propre classification pour chacune des disciplines. En Suisse, les compétitions de course à pied sont gérées par la Fédération suisse d'athlétisme – Swiss Athletics qui définit les courses de montagne en 3 catégories comme le montre la figure 2.

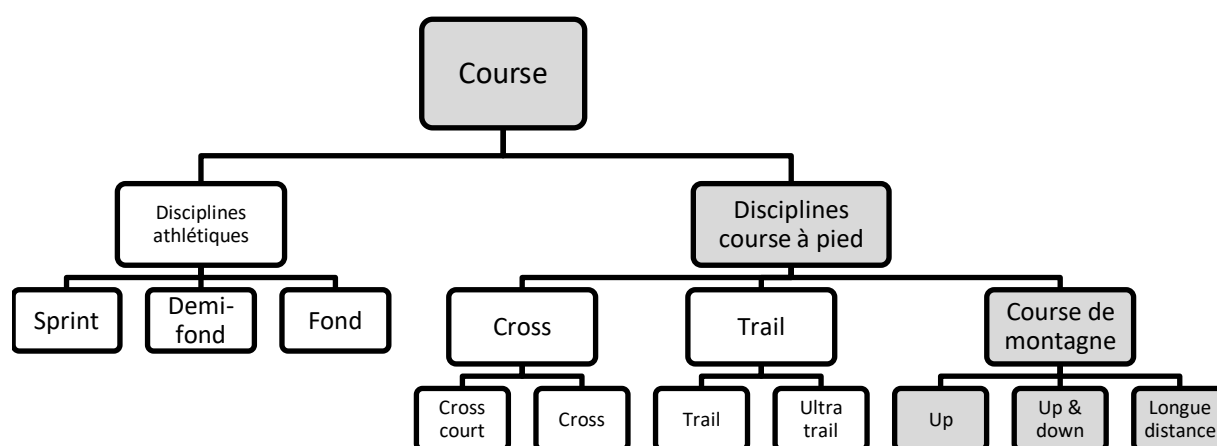


Figure 2. La classification des disciplines de la course à pied selon Swiss Athletics.

Pour que le parcours soit classé « course de montagne » et puisse organiser le championnat suisse, il doit mesurer au maximum 15 kilomètres et posséder entre 600 et 800 mètres de dénivellation positive (Suter, 2014).

En France, le parcours doit contenir au minimum 500 mètres de dénivelé positif et un écart entre le point le plus bas et le plus haut de 300 mètres. De plus, le temps réalisé par les premiers ne doit pas dépasser pas les 75 minutes sans quoi la discipline sera considérée comme un trail (Paturel & Montico, 2018).

1.2.1 Distinction d'effort entre course sur route et course de montagne. La course de montagne se différencie de celle à plat par deux points d'ordre biomécanique. Premièrement, le mouvement en montée se démarque par l'obligation d'élever son centre de gravité et porter son poids vers le haut. Autrement dit, chaque appui sera plus haut que le précédent. L'avantage des montées est la réduction du temps d'impact avec le sol. Cependant, l'énergie élastique accumulée et rendue à chaque foulée, se réduit également (Sordello, 2015). Cette dernière diminue de 32.5 à 15% lors d'un effort en côte par rapport au plat (Minetti, Ardigo & Saibene, 1994). Deuxièmement, le mouvement en descente impactera également le résultat. Trop souvent sous-estimées, les descentes font partie intégrante d'un entraînement spécifique à la course de montagne. Faire preuve d'agilité et de technique dans les pentes ascendantes possède toute son importance et son entraînement pourrait faire gagner de précieuses minutes à l'athlète (Paturel & Montico, 2018).

Au niveau physiologique, les mouvements à plat et en pente se distinguent par leur travail musculaire. Lors des différentes phases de la foulée, il existe deux types de régime de contraction : excentrique lors de l'amortissement quand les muscles s'allongent et concentrique pour la phase d'élévation quand ils se raccourcissent.

En fonction du pourcentage d'inclinaison de la pente, la part d'utilisation entre l'excentrique et le concentrique varie et influence le coût énergétique de l'athlète puisque ces deux types de contraction ne sont pas équivalents. La contraction concentrique requiert 2 à 5 fois plus d'énergie que l'excentrique. Sur une pente nulle, le travail se fera de manière équilibrée entre le travail concentrique et excentrique alors qu'en pente positive entre -15 % et +15 %, on utilisera davantage le concentrique et inversement en pente négative (Praz, Jagdeeo, Praz & Dériaz, 2011). Cependant pour des montées de plus de 15 %, on ne fait qu'accélérer son corps et donc le travail concentrique sera considérable contrairement à l'excentrique qui sera négligé. C'est pourquoi lors des grandes ascensions, le coût énergétique est très élevé (Minetti, Moia, Roi, Susta & Ferretti, 2002).

Néanmoins, des constations intéressantes ont été faites par Giovanelli, Ortiz, Henninger & Kram (2016) concernant les dépenses énergétiques en montée. Le scientifique s'est penché sur différents pourcentage de pente (9.4 %, 15.8 %, 20.4 %, 24.8 %, 30 %, 35 %, et 39.2 %) avec une vitesse d'ascension fixe de 0.35 mètres de dénivellation par seconde. Les conclusions de l'étude démontrent qu'il existe une fourchette d'angles de 20.4 % à 35 % pour lesquels les coûts énergétiques sont minimisés. C'est-à-dire que pour obtenir les meilleurs résultats possibles sur des compétitions de type KM vertical, il faudrait les disputer sur une pente se trouvant dans cette zone.

Les conséquences de ces différences ne permettent pas de prédire une performance en course de montagne de la même manière qu'on le fait sur des courses de plat.

1.2.2 Prédiction en course de montagne. Contrairement au plat, il est complexe de prédire des indices d'endurance et des performances en course de montagne. La difficulté de cette prédiction réside dans la vitesse de progression dépendante de nombreuses variables. Il s'agit de facteurs tels que l'altitude, la météo, le dénivelé, la nature du sol et la configuration du parcours, qui ne permettent pas d'estimer les performances futures. De plus, il est important de posséder les ressources afin de courir à de hautes intensités mais aussi, la capacité à tenir la distance, autrement dit, de posséder un grand volume de travail. De ce fait, les athlètes doivent posséder la « capacité à être endurant sur une haute valeur de son potentiel aérobie » et la faculté de « renouveler en permanence, et de façon économique, l'énergie de la contraction musculaire » tout en supportant les chocs répétés dus aux mouvements de course (Lacroix, 2018a).

Toutes ces facteurs influencent considérablement les performances des athlètes de courses de montagne. De ce fait, il n'est pas intéressant de se pencher sur la vitesse de ces coureurs mais sur leurs intensités, voire leurs puissances développées durant l'effort. Pour cela, divers moyens sont aisément disponibles pour les athlètes. Le docteur en science du sport Pascal Balducci propose l'utilisation d'un cardiofréquencemètre qui permet, grâce à l'enregistrement de la fréquence cardiaque (FC), d'estimer l'intensité ; la FC étant un témoin fiable de la consommation d'oxygène (VO_2) qui elle-même reflète le niveau d'intensité. Il s'agit donc d'enregistrer les valeurs cardiaques exprimées en battements par minutes sur un parcours défini et de répéter l'opération, de façon échelonnée dans la saison, afin de comparer les données recueillies. Cette méthode comporte toutefois des inconvénients comme la nécessité de répéter le test sur le même parcours et dans les mêmes conditions sans quoi les données ne pourront être comparées (Balducci et al., 2016).

Un autre moyen est proposé par les auteurs Saugy et al. (2013) avec une équation permettant la comparaison entre les différentes vitesses utilisées à plat et en montée pour calculer la distance équivalente à plat :

$$Distance\ équivalente\ à\ plat = distance\ (km) + \frac{dénivelé\ positif\ cumulé\ (m)}{100}$$

Autrement dit, 100 mètres de dénivelé positif correspondent à 1 kilomètre d'effort supplémentaire qui sera ajouté à la distance du parcours en montée. Cependant, cette manière qui se base sur une moyenne de diverses expérimentations, ne se révèle pas très précise.

Si la notion de vitesse intéresse les chercheurs dans la relation entraînement - performance des courses à plat, il n'en est pas de même pour les courses avec du dénivelé. A croire les dires de Balducci (2017), la notion d'intensité serait la plus appropriée pour quantifier et comparer ce genre d'effort, ainsi naîtrait l'association « intensité – dénivelé ».

1.2.3 Association « intensité-dénivelé ». Le spécialiste de trail Eric Lacroix a réalisé une étude fort intéressante. La recherche consiste à collecter diverses valeurs issues d'une batterie de tests puis de les comparer. Tout d'abord, les sujets réalisent des tests à plat à intensité maximale : un 10'000 mètres, un 400 mètres sur piste et un VAMEVAL, test évaluant la VMA avec un départ à 8.5 km/h puis une vitesse progressive de 0.5 km/h par palier d'une minute. Ensuite, ils prennent part à un test incrémental sur ergomètre et pour terminer, à un test de terrain sous forme d'un contre-la-montre de 4.5 kilomètres pour 700 mètres de dénivelé positif.

Les conclusions de cette étude démontrent une forte corrélation entre le 10'000 mètres plat et l'ascension. Ces deux tests possèdent des valeurs similaires dans plusieurs domaines. Leurs niveaux de performance coïncidaient à une intensité d'effort d'environ 80 % de la VO_2max . Les moyennes de la FC correspondaient également puisqu'elles étaient de 182 pulsations par minutes pour le 10'000 mètres et de 179 pour la montée. La conclusion concernant la course en pente est que les meilleurs résultats ont été réalisés par les athlètes possédant les meilleurs scores sur le 10 kilomètres et par ceux ayant la VMA la plus élevée. À la suite de la corrélation élevée entre l'exercice en côte et le 10'000 mètres, il en ressort que pour ce type d'effort en côte, un entraînement intensif tel que celui généralement préconisé pour le 10'000 mètres possède toute son importance (Lacroix, 2018a).

Afin d'étudier les relations entre performances et entraînements, il est nécessaire de mesurer les adaptations physiologiques et leurs évolutions au court du temps.

1.3 Adaptations physiologiques à l'effort

Dans les sports d'endurance, la variation physiologique du passage de la filière aérobie à celle anaérobie revêt une grande importance. Il existe trois filières énergétiques : l'anaérobie alactique, l'anaérobie lactique et l'aérobie. Celles-ci permettent de créer de l'énergie sur la base de différents substrats afin de fournir un effort musculaire.

L'anaérobie alactique est la réaction la plus simple et la plus rapide. Elle opère sans oxygène et sans production lactate. Le substrat utilisé par cette filière est la créatine phosphate. Elle est utilisée pour des mouvements puissants de quelques secondes.

L'anaérobie lactique est employée lors d'efforts d'une durée de 20 secondes à 1 minute 30. Elle possède une puissance et une capacité moyenne. Le substrat est le glucose et glycogène.

L'aérobie relève d'un système oxydatif puisqu'il y a une utilisation de l'oxygène. Elle est utilisée dans les efforts d'endurance puisqu'elle possède une grande capacité, cependant sa puissance est faible (Billat, 1998).

Plusieurs adaptations relatives à cette transition aérobie-anaérobie ont été expliquées et démontrées par les scientifiques. Tous ces éléments possèdent un rôle dans les performances et le suivi d'un athlète (Asok, 2004). Quel que soit le niveau d'un coureur, il est possible de détecter sans grande connaissance certaines adaptations physiologiques au sein de l'organisme. Par exemple, l'augmentation de la fréquence respiratoire renseigne les sportifs sur l'intensité de l'effort qu'ils fournissent. Du côté des spécialistes, la physiologie de l'effort permet de mesurer avec un degré de précision élevé les adaptations physiologiques et de, par exemple, cibler les différentes allures de course en fonction des différentes adaptations cardiovasculaires (Schnitzler, 2008).

1.3.1 Système respiratoire. Lors d'un exercice physique, la demande énergétique augmente. Physiologiquement, cela se traduit par une sollicitation accrue du système respiratoire. La quantité d'oxygène consommée augmente linéairement avec l'intensité de l'exercice jusqu'à un plafonnement (Gindre, 2013).

Deux phases sont reconnaissables pour chaque individu et forment la réponse respiratoire. Tout d'abord, la ventilation augmente rapidement en réponse à la stimulation du cortex moteur. Dans un second temps, environ trois minutes après le début de l'exercice, l'augmentation demandée par les modifications métaboliques créées par l'effort, se stabilise voire faiblit. Dans un premier cas, le volume d'oxygène (VO_2) se stabilise si l'intensité de l'effort ne dépasse pas les 60 à 75 % de sa VMA. Dans le cas contraire, lors d'une compétition ou d'un test d'effort, la VO_2 augmente progressivement jusqu'à sa VO_{2max} (Guinoubi, 2017).

1.3.2 Système cardiovasculaire. Afin d'acheminer l'oxygène dans l'organisme, le système cardiovasculaire joue également un rôle central dans la production d'un effort. Les adaptations que peuvent avoir les entraînements sur ce système ne possèdent qu'un seul objectif : l'augmentation du flux sanguin vers les muscles en activité.

De ce fait, c'est le ventricule gauche dont la fonction est d'éjecter le sang chargé en oxygène dans la circulation artérielle qui subit les principales adaptations avec un entraînement aérobie. Sa cavité augmente afin d'avoir un meilleur remplissage et sa paroi s'épaissit pour augmenter la force de contraction (Larry Kenney, Wilmore & Costill, 2017).

1.3.3 Contribution des deux systèmes. Lors de charges physiques, les muscles ont besoin d'un apport accru d'oxygène et plus particulièrement lors d'une activité prolongée. L'O₂ est acheminé du milieu ambiant jusqu'aux mitochondries par la contribution de deux systèmes : le système respiratoire et le système cardiovasculaire. La première étape du transfert d'oxygène depuis l'air ambiant jusqu'à l'intérieur du corps se s'opère par le système respiratoire. Ensuite le système cardiovasculaire prend le relais et achemine l'oxygène vers les différents organes. Ces deux systèmes se coordonnent sans quoi l'organisme ne pourrait assurer la continuité de l'exercice physique (Guinoubi, 2017).

Entre le système respiratoire et cardiovasculaire, il existe un rapport pertinent au sujet de la vitesse de course. A partir des valeurs de FC mesurées, il est possible que déterminer le niveau d'intensité de la charge puisque, comme mentionné au point 1.2.2, les valeurs de FC concordent avec la consommation d'O₂. Selon les études menées par Gindre (2013), le début de l'augmentation de production d'acide lactique intervient en même temps que l'augmentation soudaine de la ventilation et que l'inflexion de la courbe de la FC, ce qui signifie que la courbe perd sa linéarité et approche ses valeurs maximales. C'est sur cette relation qu'il a créé le tableau entre les différents pourcentages de VO₂max et de FC.

Tableau 1

Relation des % de la VO₂max et de la FC maximale et de réserve (Gindre, 2013, p.446)

| % VO ₂ max | % FC maximale | % FC de réserve |
|-----------------------|---------------|-----------------|
| 50 | 69 | 50 |
| 60 | 76 | 60 |
| 70 | 82 | 70 |
| 80 | 89 | 80 |
| 90 | 95 | 90 |
| 100 | 100 | 100 |

Les variations simultanées de ces paramètres physiologiques ont amené les chercheurs à imaginer une vitesse optimale. Au-dessus de cette dernière, l'organisme, étant en déséquilibre respiratoire, s'épuiserait rapidement jusqu'à l'arrêt de l'exercice. Ainsi, le but des athlètes serait, par les entraînements, de repousser le seuil respiratoire afin de différer le déséquilibre respiratoire (Gindre, 2013).

1.4 Consommation maximale d'oxygène

La VO_{2max} est une valeur de référence indiquant les potentialités aérobies d'un athlète (Billat, 1998). Ce concept qui a vu le jour en 1920 par le prix Nobel de médecine et de physiologie Archibald Vivian Hill (Billat, 2013), est fortement et positivement lié à la santé, la longévité et la qualité de vie (« Firstbeat », 2014).

Le VO_2 est la quantité d'oxygène inspirée et utilisée par minute d'une personne. Cet oxygène est amené aux poumons pour être transféré via le système cardiovasculaire vers des tissus et être employé par les cellules des muscles squelettiques pour la synthèse de l'adénosine triphosphate (ATP). Ce mécanisme, nécessaire à la contraction des fibres musculaires, provient majoritairement de la voie métabolique aérobie pour les efforts d'endurance. C'est pourquoi le VO_2 est le reflet de la demande énergétique d'un athlète d'endurance.

Cette valeur peut être exprimée de deux différentes manières, soit en millilitres par minute (valeur absolue) soit en millilitres par minute et par kilogramme (valeur relative au poids de la personne). Cette dernière permet de comparer différents sujets au sein d'une même discipline (Balducci et al., 2016). Plus un athlète possèdera une grande valeur de VO_{2max} meilleur il sera. Néanmoins, il ne suffit pas d'être doté d'une grande capacité à consommer de l' O_2 . Pour atteindre des performances maximales, il est également nécessaire de posséder une capacité à maintenir une fraction élevée de son absorption maximale d' O_2 (Asok, 2004).

Pour calculer cela, les athlètes utilisent l'indice d'endurance proposée par l'équation de Peronnet. Cette dernière illustre la capacité d'un athlète à utiliser sa VO_{2max} sur une durée maximale (Billat, 1998). C'est-à-dire qu'il est incontournable de pouvoir maintenir un niveau élevé de son VO_2 ou de sa VMA en compétition tout en essayant de réduire au maximum le coût énergétique de la locomotion. Nous pouvons illustrer ces deux paramètres par le fait de posséder un grand moteur de voiture, la VO_{2max} , et d'avoir un véhicule permettant de pouvoir économiser le carburant, les ressources énergétiques (Lacroix, 2018a). C'est ainsi qu'on retrouve l'importance du travail sur l'économie de course et non pas uniquement sur la VMA. Cette dernière, souvent évoquée lors des entraînements, n'est pas le seul élément aboutissant à une performance en course à pied (Karp, 2007).

1.4.1 Facteurs limitants. Entre l'air ambiant et les muscles, il existe plusieurs facteurs limitant la VO_2 . Véronique Billat (2013) propose une classification en deux catégories : ceux régulant le transport d' O_2 de l'environnement à la mitochondrie et ceux n'étant pas liés au transport. Dans ce premier groupe, les résistances ventilatoires et les résistances cardiocirculatoires sont les principales limites à la consommation d' O_2 . Dans une moindre mesure, les résistances à la diffusion du capillaire sanguin vers la mitochondrie et les résistances mitochondriales limitent également l'absorption de l'oxygène (Balducci et al., 2016).

Au sein de la deuxième catégorie, il y a le sexe. Deux coureurs de niveau égal, selon les tables de cotation de la fédération d'athlétisme internationale, mais de sexe différent, ne possèdent pas la même VO_{2max} . Les athlètes féminines possèdent une consommation maximale inférieure à celle des hommes de 10 ml/min/kg en moyenne (Billat, Berthoin, Blondel & Gerbeaux, 2001). Un autre facteur limitant présent dans ce groupe est le poids de l'athlète. Entre deux athlètes de course de montagne possédant la même VO_{2max} , le plus léger ira le plus vite. Le rapport poids/puissance joue un rôle majeur dans les disciplines de montagne (Sordello, 2015).

En plus de ces facteurs physiologiques, un dernier élément est à prendre en compte lors de mesures de VO_2 : la comparaison entre les disciplines sportives pratiquées. Même si chacune d'elles s'exerce de manière soutenue, elles ne sont pas toutes équivalentes.

1.4.2 Relation de la VO_{2max} à plat et montée. Peu d'études traitent des relations entre la VO_{2max} en montée et celle à plat. Les rares recherches s'intéressant à ces corrélations ne permettent pas de tirer des conclusions intéressantes puisqu'elles se contredisent. Comme l'écrivent Balducci et al. (2016) dans leur étude, Paavolainen, Nummela & Rusko (2000) ont démontré que la montée permettait d'atteindre des valeurs de VO_{2max} supérieures au plat. D'autres, Davies, Sargeant & Smith (1974), Kasch, Wallace, Huhn, Krogh & Hurl (1976), ont prouvé le contraire. Quant à Wilson, Monego, Howard & Thompson, (1979) ils n'ont pas trouvé de différences.

Pour donner suite à ces résultats peu convaincants, Balducci (2017) mit en place une étude permettant de déterminer d'éventuelles corrélations entre la VO_{2max} et le coût énergétique d'une performance en montée et à plat chez des experts. Pour cela, il a effectué des tests incrémentaux à 25 % de pente, 12.5 % de pente ainsi qu'à plat.

Tableau 2

Corrélations des paramètres physiologiques en fonction de la pente (Balducci, 2017, p.71)

| Coefficient de corrélation | | VO ₂ max | FCmax | Lactate | Coûts énergétiques |
|----------------------------|--------|---------------------|--------|---------|--------------------|
| 12.5 % | 0 % | 0.77** | 0.70* | 0.78** | 0.10 |
| 25 % | 12.5 % | 0.84** | 0.79** | 0.52 | 0.78** |
| 25 % | 0 % | 0.88*** | 0.64* | 0.74* | 0.09 |

Les conclusions de cette recherche permettent d'affirmer l'existence de corrélations significatives des différents facteurs physiologiques tels que la VO₂max, la FC maximale et le lactate, entre les différents pourcentages de pente et à plat. Cependant, les différents coûts énergétiques sont corrélés uniquement entre les différents pourcentages de pente mais ne le sont pas avec le plat. C'est-à-dire qu'un athlète avec une faible dépense énergétique à plat peut avoir une mauvaise économie de course en montée. Néanmoins, la différence de pente n'influence que peu le coût énergétique global puisqu'il en ressort une forte corrélation. La conclusion de cette étude montre que le coût énergétique est un facteur de performance en course de montagne (Balducci et al., 2016).

1.4.3 Corrélation entre distances et intensité. D'autres paramètres de la VO₂max, comme les distances, sont également intéressants à connaître. Autant sur 1500 mètres que sur marathon, il existe une forte corrélation entre la VO₂max et la performance d'un athlète. Ce phénomène provient du fait qu'un coureur possède le même nombre de foulées par minute sur ces distances. Jusqu'à sa VMA, seule l'amplitude de mouvement permet au sujet d'augmenter sa vitesse. Cependant au-dessus de sa VMA, le coureur est contraint d'augmenter sa fréquence, c'est-à-dire son nombre de foulée par minute, voire même augmenter son amplitude pour du sprint (Billat, 2013).

Le scientifique Asok (2004) qualifie la VO₂max comme le paramètre le plus important sur un plan physiologique pour réaliser de grandes performances dans les sports d'endurance. Pour cette raison, une corrélation linéaire a été observée par divers spécialistes de physiologie entre la VO₂max et les performances d'endurance. Le coefficient de corrélation varie de 0.52 à 0.98. Néanmoins, il ne faut pas négliger la capacité à maintenir une fraction élevée de sa VO₂max et de ne pas seulement posséder une valeur élevée de VO₂max (Conley & Krahenbuhl, 1980).

Cela démontre l'importance de ce paramètre en tant qu'indicateur de performance aérobie. Plus il possède une grande VO₂max, plus l'athlète est apte à obtenir de meilleurs résultats.

Néanmoins, du côté des professionnels, ce paramètre n'est plus corrélé à la performance. Dans le sport d'élite, d'autres facteurs rentrent en ligne de compte à l'instar de l'efficacité de la foulée ou du coût énergétique (Gindre, 2013).

Les corrélations entre les paramètres cités précédemment permettent de croire que la $VO_2\text{max}$ est un bon indicateur de performance.

1.4.4 Indicateur de performance. La thématique des prédictions de performance et la $VO_2\text{max}$ sont des notions étroitement liées. Les physiologistes du sport Billat et al. (2001) les mettent en relation en écrivant : « La $VO_2\text{max}$ est un critère d'appréciation de l'aptitude à réaliser des performances en course à pied et comme point de repère pour déterminer les vitesses idéales en vue d'optimiser l'entraînement des coureurs ».

La puissance du métabolisme aérobie d'un athlète d'endurance est fortement corrélée à sa performance. De ce fait, chez des coureurs de niveau amateur, l'amélioration de leur $VO_2\text{max}$ entraîne vraisemblablement une amélioration de son temps de course. Par conséquent, la $VO_2\text{max}$ indique l'état de forme des athlètes. Les études réalisées sur des échantillons d'une grande diversité démontrent que la $VO_2\text{max}$ est un bon indicateur de performance aérobie (Anderson, 2013).

Du côté des coureurs élités, la $VO_2\text{max}$ ne devient plus le seul paramètre déterminant d'une performance de haut niveau. Autrement dit, deux personnes s'entraînant de manière similaire et possédant les mêmes performances n'auront pas systématiquement la même $VO_2\text{max}$ ou deux coureurs possédant la même $VO_2\text{max}$ n'obtiendront pas forcément des résultats semblables. La corrélation pour des sportifs possédant la même $VO_2\text{max}$, entre performance et $VO_2\text{max}$ devient faible comme le montre Conley & Krahenbuhl (1980) dans leur étude. Une autre recherche conclut que la corrélation est même non-significative (Lacour, Padilla-Magunacelya, Barthelemy & Dormois, 1990).

Afin d'expliquer les différences entre les différents athlètes, il est nécessaire de prendre en compte les facteurs physiologiques, biomécaniques et psychologiques prenant davantage de place que la $VO_2\text{max}$ déjà fortement élevée. C'est ce qu'ont fait les scientifiques Di Prampero, Atchou, Bruckner & Moia (1986) en proposant un modèle avec les paramètres de la $VO_2\text{max}$, de la fraction de cette dernière, c'est-à-dire le temps que l'athlète peut tenir à $VO_2\text{max}$, et le coût énergétique de la course.

Pour illustrer ce fait, prenons l'exemple d'un coureur amateur qui augmente sa $VO_2\text{max}$ de 2 ml/min/kg, alors ce dernier pourrait améliorer d'un quart d'heure son temps au marathon. Quant à un coureur élite, avec la même augmentation de sa $VO_2\text{max}$, il améliorerait son

temps au marathon seulement d'une minute et 30 secondes (« Firstbeat », 2014). Afin de comprendre cela, l'indice d'endurance exprimant la capacité à maintenir dans le temps un pourcentage élevé de sa VMA, devient un aspect important.

Comme le montre une étude entre des coureurs kényans et européens, les africains ne possèdent pas des valeurs supérieures de $VO_2\text{max}$ cependant ils ont une meilleure capacité à la maintenir dans le temps (Bosch, Goslin, Noakes & Dennis, 1990). D'un point de vue physiologique, le maintien de sa fraction de $VO_2\text{max}$, appelé également capacité aérobie maximale, permet de retarder l'acidose métabolique. Ce phénomène signifie que le seuil anaérobie est fortement corrélé à la performance (Asok, 2004).

1.4.5 Vitesse maximale aérobie et vitesse à $VO_2\text{max}$. Chaque athlète consomme, au repos, une quantité d'oxygène donnée qui augmente linéairement avec l'intensité de l'exercice jusqu'à un plafonnement, soit le volume d'oxygène maximal qui peut être consommé. C'est en 1984 que la notion de vitesse à $VO_2\text{max}$ fait son apparition par les chercheurs Daniels, Scardina, Hayes & Foley (1984). La $vVO_2\text{max}$ explique les différences individuelles de performance entre des athlètes élites, contrairement à la $VO_2\text{max}$ et aux coûts énergétiques qui ne le peuvent pas (Billat, Hill, Pinoteau, Petit & Koralsztejn, 1996). La VMA est ainsi la résultante de la combinaison de deux paramètres de la performance.

- Premièrement, la $VO_2\text{max}$ est le VO_2 maximum que les muscles peuvent utiliser par minutes durant l'effort. Plus simplement, elle est le résultat du transfert d'oxygène entre la bouche au cœur, aux poumons et aux muscles (Lacroix, 2018a).
- Deuxièmement, elle est l'efficacité de la technique de course de l'athlète qui influence l'économie de course.

La $VO_2\text{max}$ peut être comparée à la cylindrée d'un véhicule. C'est à partir de celle-ci qu'il sera possible de donner une vitesse maximale aérobie. Une fois cette VMA dépassée, l'athlète basculera dans la zone anaérobie (Bazin & Delorme, 2015). Elle n'est autre que la capacité fonctionnelle du processus d'assimilation, de transport et d'utilisation de l' O_2 par le corps (Sordello, 2015). En restant dans la métaphore, il existe plusieurs facteurs, autre que le moteur, influençant la performance. Ces derniers sont le choix des pneus, l'état des amortisseurs et même la carrosserie de la voiture. En course à pied, il en va de même avec l'économie de course qui est le résultat de la technique, du renforcement musculaire, de la coordination et bien d'autres éléments influenceurs de performances (Bazin & Delorme, 2015).

Lorsqu'on s'entraîne à des allures de VMA, soit à v_{VO_2max} , les adaptations physiologiques permettront au corps de maintenir davantage d'intensité et de volume d'entraînement. Les effets engendrés par ce type d'intensité permettent diverses augmentations de la VO_2max , de la capacité aérobie des fibres musculaires ainsi que de la quantité et la disponibilité de myoglobine (Weineck, 1996).

1.4.6 Vitesse ascensionnelle – Vitesse verticale. Pour les courses de montagne, la vitesse de progression n'est pas la VMA qui est une donnée basée sur des parcours plats, mais la vitesse ascensionnelle (VA). Cette dernière, qui informe sur sa capacité à courir un dénivelé positif en l'espace d'une heure, est un bon indicateur pour la vitesse verticale d'un athlète et donc un bon indicateur de progrès (Lacroix, 2018a).

1.5 Mesurer sa VO_2max

L'évaluation de la VO_2max peut s'effectuer soit de façon indirecte en extrapolant sa valeur à partir d'autres variables telles que la VMA, soit de façon directe en enregistrant les échanges gazeux durant un test d'effort maximal (Cazorla, 2004). Tout d'abord, nous présenterons les moyens d'extrapolation à partir de la VMA, puis nous nous intéresserons aux différents tests.

1.5.1 Extrapolation de la VO_2max . Il existe différentes équations de prédiction de la VO_2max à partir de sa vitesse maximale aérobie. La plus simple d'entre elles vient des chercheurs Léger & Mercier (1983).

$$VO_2max \text{ (ml/min/kg)} = 3.5 \times VMA \text{ (km/h)}$$

Toutefois, il est nécessaire de garder une marge d'erreur de $\pm 5 \%$ qui relève du coût énergétique de la course (Cazorla, 2014). Le tableau récapitulatif ci-dessous présente les nombreux chercheurs proposant des équations de prédictions.

Tableau 3

Prédiction de VO₂max en fonction de sa VMA (Cazorla, 2014, p.15)

| Références | Équations de prédiction Y = VO ₂ ml·min ⁻¹ ·Kg ⁻¹ . V= Vitesse de course en km.h ⁻¹ . | VO ₂ max prédit avec une VAM de 20 km.h ⁻¹ | |
|---------------------------|---|---|--------------------------|
| | | Sans correc- tion (1) | Avec cor- rection (2) |
| Astrand, 1952 | $Y = 2.93 \cdot V + 9.33$ | 67.9 | 72.1 |
| Balke, 1963 | $Y = 2.86 \cdot V + 10.2$ | 67.4 | 71.6 |
| Margarita et al., 1963 | $Y = 3.33 \cdot V + 3.5$ | 70.1 | 74.3 |
| Shephard, 1963 | $Y = 2.98 \cdot V + 7.6$ | 67.2 | 71.4 |
| Pugh, 1970 | $Y = 2.979 \cdot V + 4.245$ | 63.8 | 68.0 |
| Costill et al., 1973 | $Y = 4.2 \cdot V - 15.24$ | 63.8 | 73.0 |
| Costill et al., 1973 | $Y = 3.4 \cdot V - 5.24$ | 62.8 | 67.0 |
| ACSM, 1975 | $Y = 3.0625 \cdot V + 5.25$ | 66.5 | 70.7 |
| Bransford et Howley, 1977 | $Y = 340 \cdot V - 0.51$ | 67.5 | 71.7 |
| Mc Miken et Daniel, 1976 | $Y = 2.867 \cdot V + 5.363$ | 62.7 | 66.9 |
| Mayhew, 1977 | $Y = 3.318 \cdot V - 0.82$ | 65.5 | 69.7 |
| ACSM, 1980 | $Y = 3.3478 \cdot V + 3.275$ | 70.2 | 74.4 |
| Léger et Boucher, 1980 | $Y = 14.49 + 2.143 \cdot V + 0.0324 \cdot V^2$ | - | 70.31 (*) |
| Léger et Mercier, 1983 | $Y = 1.353 + 3.163 \cdot V + 0.0122586 \cdot V^2$ | - | 69.50 (*) |
| Léger et Mercier, 1983 | $Y = 2.209 + 3.163 \cdot V + 0.000525 \cdot V^3$ | - | 69.70 (*) |
| Léger et Mercier, 1983 | $Y = 3.5 \cdot V$ | - | 70.00 (*) |

(*) équation valide pour les tests de terrain.
 (1) résultat sans correction obtenu à partir de la course sur tapis roulant
 (2) résultat avec corrections en tenant compte de la résistance de l'air

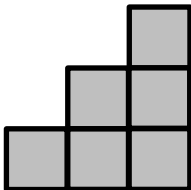
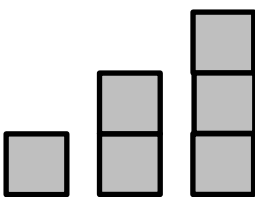

Parmi ces nombreuses équations de prédictions, celle de Léger & Mercier (1983) s'avère être la plus simple puisqu'elle est la moyenne des toutes les équations recensées. Néanmoins, les résultats présentent une marge d'erreur liée aux coûts énergétiques de l'athlète de $\pm 5\%$ (Cazorla, 2014). Afin de mesurer précisément sa VO₂max, il existe de nombreux tests à réaliser en laboratoire. Ces derniers exigent un équipement sophistiqué et onéreux qui les rend moins aisément accessibles.

1.5.2 Tests de terrain versus laboratoire. Depuis 1982 les épreuves progressives ont été introduites en France dans le but de mesurer la puissance maximale aérobie et ainsi d'extrapoler la VO₂d'un athlète. Avant cela, le test des 12 minutes de Cooper était généralement utilisé pour mesurer les performances de chaque athlète. Depuis lors, de nombreux tests ont vu le jour (Cazorla, 2004). Il existe différents protocoles de test d'effort. Le premier, appelé rectangulaire, consiste courir le plus vite possible dans un laps de temps donné. Il exige de l'athlète qu'il soit capable de gérer son énergie de façon que la fin du test corresponde avec

l'épuisement de ses ressources énergétiques. La difficulté réside dans sa capacité à garder une allure si possible constante la plus élevée possible. Le second est appelé triangulaire, puisque l'intensité progresse de façon linéaire dans la durée. Ces derniers sont même divisés encore en deux sous-catégories : une continue (sans arrêt) et l'autre discontinue (arrêt entre les différents paliers). Dans le tableau ci-dessous, nous illustrons les classifications des tests avec un exemple de chaque.

Tableau 4

Différents types de tests (Cazorla, 2014, p.4)

| Tests triangulaires | | Tests rectangulaires |
|--|--|---|
| Epreuve continue | Epreuve discontinue | |
| Test trail de la CRR - SUVA | Test Mercier | Test Cooper |
|  |  |  |
| Paliers de 3 minutes Incrément 3 % de pente | 3 minutes d'effort 3 minutes de pause Incrément +50m. | 12 minutes de course à 90-95 % de VO ₂ max |

Afin de valider un test de VO₂max, il est important de respecter certains critères. Ces derniers, proposés par l'initiateur du test VAMEVAL et docteur en biologie de l'activité musculaire Georges Cazorla (2004), attestent que les sujets ont fourni un effort maximal et de ce fait que les différentes analyses physiologiques soient utilisables à différentes fins.

- Le sujet a mis terme à son exercice parce qu'il était parvenu à épuisement.
- L'augmentation de la FC et de la VO₂max plafonnent lors des derniers paliers, avant de diminuer.
- Le quotient respiratoire dépasse 1.10.
- La concentration de lactate sanguin atteint de valeurs supérieures à 9 mmol/L (p.4).

Une fois la VO₂max connue, il est intéressant de pouvoir personnaliser ses entraînements. Grâce à la valeur de VMA exprimée en kilomètres par heure, il est possible d'estimer la durée minimale réalisable sur différentes distances. Divers moyens simples et efficaces existent pour les athlètes.

1.5.3 Prédiction. Plusieurs auteurs, à l'instar de Léger & Mercier en 1983, ont créé leur table de prédictions en se basant sur les rapports de performance et de $VO_2\text{max}$ (Cazorla, 2004). L'auteur et docteur en sciences du sport Cyrille Gindre l'a également réalisé en proposant une compilation de plusieurs études scientifiques formant des estimations de temps pour les sportifs (Gindre, 2013). Un exemple de table avec laquelle il est possible de prédire une performance sur différentes distances en fonction de la vitesse maximale aérobie ou de la $VO_2\text{max}$, est présenté ci-dessous.

Tableau 5

Prédiction de temps en fonction de la VMA / $VO_2\text{max}$ (Gindre, 2013, p.139)

| VMA (km/h) | $VO_2\text{max}$ (ml/min/kg) | 5'000 m. | 10'000 m. | 21'100 m. Semi-marathon |
|------------|------------------------------|----------|-----------|----------------------------|
| 14 | 46 | 24'20 | 49'00 | 1h50 |
| 15 | 50 | 22'30 | 46'00 | 1h43 |
| 16 | 54 | 20'50 | 43'00 | 1h37 |
| 17 | 58 | 19'30 | 40'30 | 1h31 |
| 18 | 62 | 18'20 | 38'20 | 1h25 |
| 19 | 66 | 17'10 | 36'10 | 1h20 |
| 20 | 70 | 16'10 | 34'00 | 1h15'30 |
| 21 | 74 | 15'10 | 32'10 | 1h11 |
| 22 | 78 | 14'20 | 30'30 | 1h07 |
| 23 | 82 | 13'40 | 29'00 | 1h04 |
| 24 | 86 | 13'00 | 27'30 | 1h01 |

L'évaluation de sa $VO_2\text{max}$ effectuée de façon indirecte ou directe permet, en plus d'estimer ses performances, de préparer un plan d'entraînement et des objectifs de manière ciblée et précise. Afin de le faire au mieux, il est donc nécessaire de connaître ses limites physiologiques. Ainsi, d'autres mesures seraient nécessaires afin de prédire de manière la plus précise possible ses performances en course de montagne. Pour cela, l'auteur Eric Lacroix propose trois différents tests à réaliser :


- Pour l'intensité : un test de VMA
- Pour la résistance musculaire : un test de résistance musculaire
- Pour le dénivelé : un test de montée

Ces trois tests permettront de mieux axer les futurs entraînements (Lacroix, 2018b). Une fois les valeurs mesurées, il est possible de cibler les entraînements et de travailler dans différentes intensités. Pour cela, les spécialistes en physiologie de l'exercice ont créé des tableaux avec des zones d'intensité pour un entraînement personnalisé.

1.5.4 Zones d'intensité de l'entraînement. Les zones d'intensité de l'entraînements que proposent les différents scientifiques sont étroitement rattachées aux modifications énergétiques de l'organisme. Au sein de cette classification, les trois voies métaboliques sont représentées : aérobie, anaérobie lactique et anaérobie alactique ainsi que les différents paramètres physiologiques ou la VMA. Par ces différents moyens, il est possible d'évaluer les performances à diverses intensités et de planifier un entraînement ou l'évaluer (Gindre, 2013). Le tableau suivant a été pensé par Cyrille Gindre, chercheur titulaire d'un doctorat en sciences du sport.

Tableau 6

Zones d'entraînements (Gindre, 2013, p.52-53)

| Zone d'entraînement | Zone verte | | Zone jaune | Zone orange | Zone rouge |
|------------------------|---|-----------|------------|-------------|------------|
| | Lent | Moyen | Rapide | Intervalles | Fractionné |
| Vitesse (% VMA) | 60 % | 75 % | 80-90 % | 100 % | >110 % |
| F. Cardiaque (% max) | 72 % | 85 % | 92 % | 100 % | / |
| Temps maximal | x h. | 3 h. | 1 h. | 6 min. | < 4 min. |
| Course repère | Trails | Marathons | Semi/10km | 1500 m. | 800m. |
| Durée séance facile | 45 min. | 30 min. | 20 min. | 5 min. | 1 min. |
| Durée séance difficile | x h. | 1,5 h. | >40 min. | >12 min. | 5 min. |
| Continuum actuel |  De l'aérobie à l'anaérobie | | | | |

D'autres tableaux sont également disponibles par différents auteurs et différentes physiologistes. Le but de ces tabelles est de pouvoir fournir des valeurs personnalisées grâce aux tests préalables et simple d'utilisation afin d'appliquer une charge à allure ciblée.

1.6 Objectif du travail

Le but de ce travail est d'établir une prédiction de performance en course à pied de montagne selon les normes définies par Swiss Athletics. L'estimation sera effectuée sur la base des résultats obtenus au moyen du test trail de la SUVA – CRR (Clinique Romande de Réadaptation) ainsi que sur les différentes corrélations des paramètres physiologiques entre la course à plat et en montée qu'offre la littérature. Par ce biais, nous essaierons de définir une vitesse ascensionnelle pour nos sujets. Cette dernière m'indiquera la dénivellation effectuée dans un rapport temporel. L'utilisation des prédictions déjà étudiées sur terrain plat me servirons de base pour débiter nos recherches.

Une fois la vitesse d'ascension trouvée (dénivellation / heure), nous pourrons tenter d'estimer

un temps pour un parcours sélectionné tout en tenant compte des différents paramètres du tracé. Un étalonnage sera établi et inséré dans notre calcul final afin de quantifier les différents paramètres objectivement non-mesurables, tels que les changements de direction, la configuration du parcours et la nature du sol, influençant le résultat de l'athlète.

1.7 Questions de recherche

Les questions qui découlent de notre réflexion pour ce travail sont les suivantes :

- Existe-t-il une manière de modéliser les résultats afin de prédire une performance en course à pied de montagne sur la base du test « trail » de la CRR – SUVA ?
- Peut-on s'appuyer sur une modélisation fiable et individualisée des résultats obtenus par le test « trail » de la CRR – SUVA pour prédire une performance en course à pied de montagne ?

1.8 Hypothèses

Le but de ce travail est d'évaluer plusieurs modèles de régression afin de prédire des temps de course en montagne. Nous faisons ainsi les hypothèses (alternatives) que les combinaisons de variables indépendantes suivantes permettent d'expliquer le temps de course :

- H_1^a La VMA et la VO_{2max} permettent d'expliquer le temps de course ;
- H_1^b La distance équivalente à plat permet d'expliquer le temps de course ;
- H_1^c La VA de la course et du test permettent d'expliquer le temps de course.

2 Méthode

Les méthodes que nous avons établies pour ce travail de master ont été pensées en fonction de nos ressources matérielles et de nos différents intérêts liés à la course à pied de montagne. Notre travail s'effectuera en parallèle avec celui de Christelle Crettol avec qui nous collaborerons étroitement pour la recherche de sujets et la réalisation des tests. Son travail de Master consistera, tout comme celui-ci, à prédire une performance en course de montagne. Cependant ses recherches basées sur l'intelligence artificielle se réaliseront avec les données enregistrées sur les montres connectées.

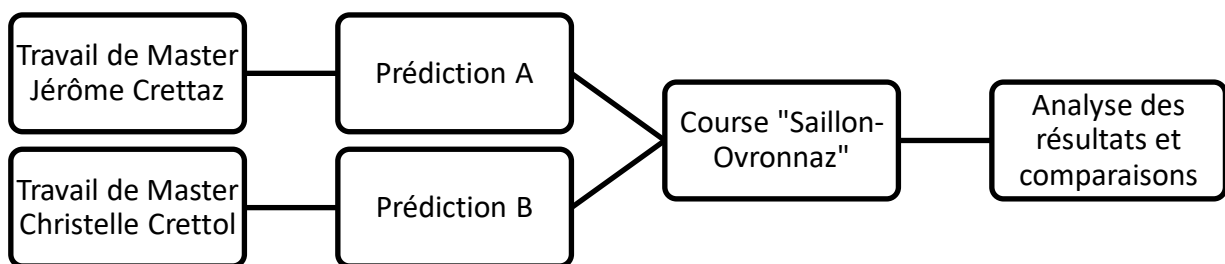


Figure 3. Travaux de master.

2.1 Description de l'échantillon

Pour les tests en laboratoire, nous avons sélectionné 21 sujets dont 13 hommes et 8 femmes. La moyenne d'âge des participants était de 28 ans avec un écart type de ± 8 . Cependant, seuls 12 sujets ont pu prendre part à la course afin de valider les prédictions. Cet échantillon possède une moyenne d'âge de 27 ans (± 9). Les sujets ont été recrutés par différents moyens. Tout d'abord, nous avons fait appel à notre entourage (famille, collègues, universitaires, ...) en sélectionnant des athlètes issus des différents clubs d'athlétisme tels que le Centre Athlétique du Bas Valais à Martigny, le Club athlétique de Sierre et de Marly, le TSV Dürdingen ou encore le BCVS Mount'ASICS team. Dans un second temps, nous avons recruté des athlètes de trail en nous rendant à Sion à l'occasion du Trail des châteaux de 2018. Enfin, nous avons eu l'aide des organisateurs de la Course du Soleil à Sierre et du Préalpes Trail du Mouret qui, via leurs réseaux sociaux, ont fait de la publicité pour nos études.

Les intéressés étaient invités à remplir un formulaire internet afin que nous puissions évaluer leur niveau en course à pied ainsi que leurs données physiologiques. Ils étaient également priés de nous renvoyer leurs données d'entraînement des montres connectées pour le travail « Comparaison de méthodes d'apprentissage pour la prédiction de performance en course de montagne » de Christelle Crettol.

Ensuite, les athlètes étaient sélectionnés afin de posséder un équilibre entre les athlètes de niveau avancé à amateur, entre les spécialistes de plat et de montée et entre les sexes. La moyenne d'entraînements de course à pied par semaine de nos sujets était de 3.85 (avec un écart type de ± 1.63).

Les participants ont été contactés par mail afin de contrôler leur état de santé par un document à lire et à signer sur place le jour du test. Tous les sujets n'ayant jamais subi de diagnostic relatif à une maladie cardiaque ou respiratoire et ne présentant aucune douleur ou blessures éventuelles étaient invités à prendre part à l'étude. Ces formulaires (cf. annexes) étaient établis sur la base de documents de la société canadienne de physiologie de l'exercice.

2.2 Design de l'étude

Nous utiliserons le test « trail » de la CRR – SUVA afin d'établir une prédiction sur le parcours de la course « Saillon – Ovronnaz ». Par la suite, les participants effectueront le test de terrain en réalisant le tracé. Ainsi, le résultat du test de terrain et celui de notre prédiction pourront être comparé et vérifié. Cette étude relève d'une analyse transversale.

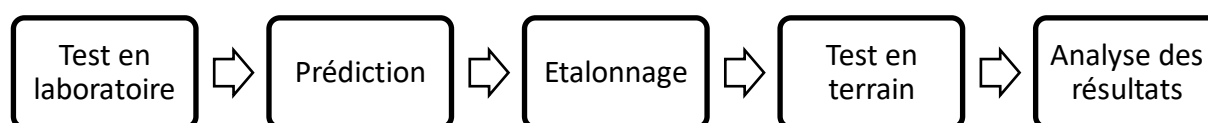


Figure 4. Déroulement du travail de master.

2.3 Description détaillée des méthodes

Bien que le choix du test « trail » semble être évident pour ce type de recherche, nous avons entrepris diverses analyses avant de valider son utilisation. Dans un premier lieu, nous avons pris contact avec des spécialistes de sports d'endurance tels que Nicolas Montavon du centre de compétences en médecine du mouvement et du sport des Hôpitaux Fribourgeois, Michael Duc et Arnaud Rapillard de la Clinique Romande de Réadaptation – SUVA. A la suite de ces échanges et des conseils reçus de leur part, le test proposé par la CRR – SUVA semblait être le plus approprié pour une telle recherche et convenait aux ressources logistiques dont disposait l'Université de Fribourg. Le matériel ainsi que la disponibilité des locaux universitaires me permettaient de réaliser l'étude selon la planification prévue.

En second lieu, nous étions invités à venir effectuer le test « trail » au sein du laboratoire de sport de la CRR – SUVA à Sion afin de se familiariser avec son protocole et de se préparer à accueillir nos sujets. De plus, nous avons profité du feedback dispensé par le spécialiste Ar-

naud Rapillard afin de pouvoir, lorsque nous prendrons la place de l'expérimentateur, en faire de même.

L'expérimentation était divisée en deux grandes phases. La première était de réaliser la course de montagne Saillon – Ovronnaz et la seconde consistait à la réalisation de notre expérimentation en laboratoire.

2.3.1 Course Saillon – Ovronnaz. La course Saillon – Ovronnaz, première manche de la coupe valaisanne des courses de montagne, a été choisie en fonction de son profil et de la période dans laquelle elle se situait. Elle s'est déroulée le 27 avril 2019 par un temps couvert et une température moyenne de 8 degrés. Son profil contient 852 mètres de dénivellation positive ainsi que 83 mètres de négative pour une distance de 9.23 kilomètres. La nature du sol du parcours comprend 25 % de sentiers pédestres, 25 % de route goudronnée et 50 % de route en terre battue. Chacun de nos sujets ont pu bénéficier de deux ravitaillements sur le parcours. Les données récoltées par nos soins provenaient des montres personnelles de nos sujets et du chronomètreur officiel de la course. L'unique mesure réalisée par nos moyens était la perception de l'effort de nos sujets en fin de course.

2.3.2 Test trail. La deuxième phase consistait à réaliser les tests en laboratoire à l'Université de Fribourg. Pour cela, nous avons réservé le laboratoire COPLAB pour 3 jours afin d'effectuer les 21 tests. Ces derniers ont eu lieu le 1, 2 et 3 mai 2019.

Le déroulement du test a débuté par l'accueil du participant. Il consistait tout d'abord à signer le formulaire de consentement concernant le déroulement du test (annexe) ainsi que l'évaluation globale de sa santé par un questionnaire (annexe). Ce dernier abordait les éventuels problèmes cardiorespiratoires. Ces deux documents étaient déjà connus par les participants puisqu'ils l'avaient reçu par courrier électronique une dizaine de jours auparavant. Néanmoins pour des raisons de sécurité, ils étaient nécessaires afin de connaître l'état de forme du participant pour la réalisation ou non du test. Ensuite, le protocole du test était expliqué au sujet.

La suite du test était réservée à la mesure du poids des participants, à l'estimation de leur état de forme ainsi qu'à la pose du matériel de mesure avec la ceinture de mesure de FC et du masque à oxygène.

Enfin, le test pouvait débuter avec les mesures au repos : première prise de lactate, calcul de VO_2 et de la FC. Une fois terminé, le sujet débutait le test à la vitesse constante choisie : 5, 7 ou 10 km/h à 0 % de pente. Ce palier correspondait à l'échauffement, puis chaque 3 minutes,

la pente augmentait de 3 % jusqu'à épuisement total du sujet. Le tapis de course avait la possibilité d'atteindre une pente maximale de 24 %, ce qui correspondait au même pourcentage que celui de la CRR – SUVA. Afin de mesurer l'épuisement total nécessaire pour obtenir les meilleures valeurs possibles, nous avons mesuré à chaque palier la perception de l'effort du sujet avec l'échelle de Borg. Concernant les mesures de lactate, elles ont été effectuées chaque deux paliers, soit chaque 6 minutes et la VO_2 était évaluée en continue.

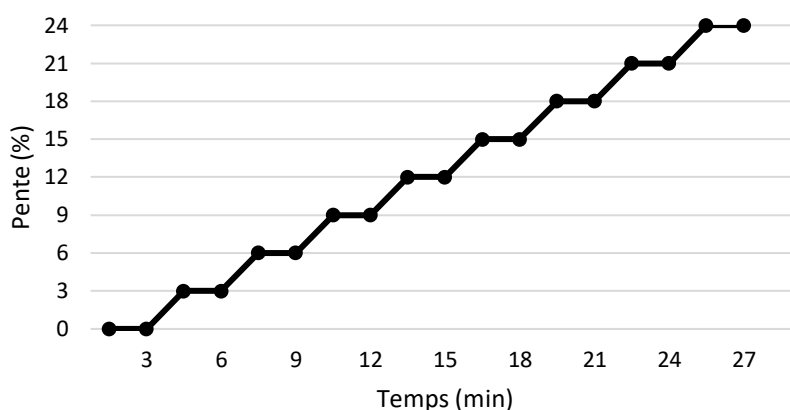


Figure 5. Profil du test « trail » de la Clinique Romande de Réadaptation.

2.4 Instruments de recherche

L'expérience a été réalisée sur deux sites différents. La course s'est déroulée au sein des Alpes valaisannes entre Saillon et Ovronnaz quant aux tests, ils ont eu lieu à l'Université de Fribourg dans le laboratoire des Sciences du sport et du mouvement à Fribourg, plus précisément au COPLAB du Professeur Jean-Pierre Bresciani dans le bâtiment Pérolles 21.

- Le tapis de course utilisé était de la marque H/P/Cosmos – Mercury et possédait une inclinaison possible jusqu'à 24 %.
- L'appareil de spirométrie utilisé pour mesurer les échanges gazeux des sujets provient de la marque allemande Oxycon Pro (Jaeger, Höchberg).
- L'appareil de mesure du lactate choisi était le modèle Lactate ProTM 2.
- Afin de mesurer la FC, une ceinture pectorale Polar H10 était utilisée. Les données « beat to beat » étaient directement enregistrées sur l'application Polarbeat.
- Pour aérer et ventiler la salle, 3 appareils de la marque Primotecq STV 501 de Luxe étaient utilisés.

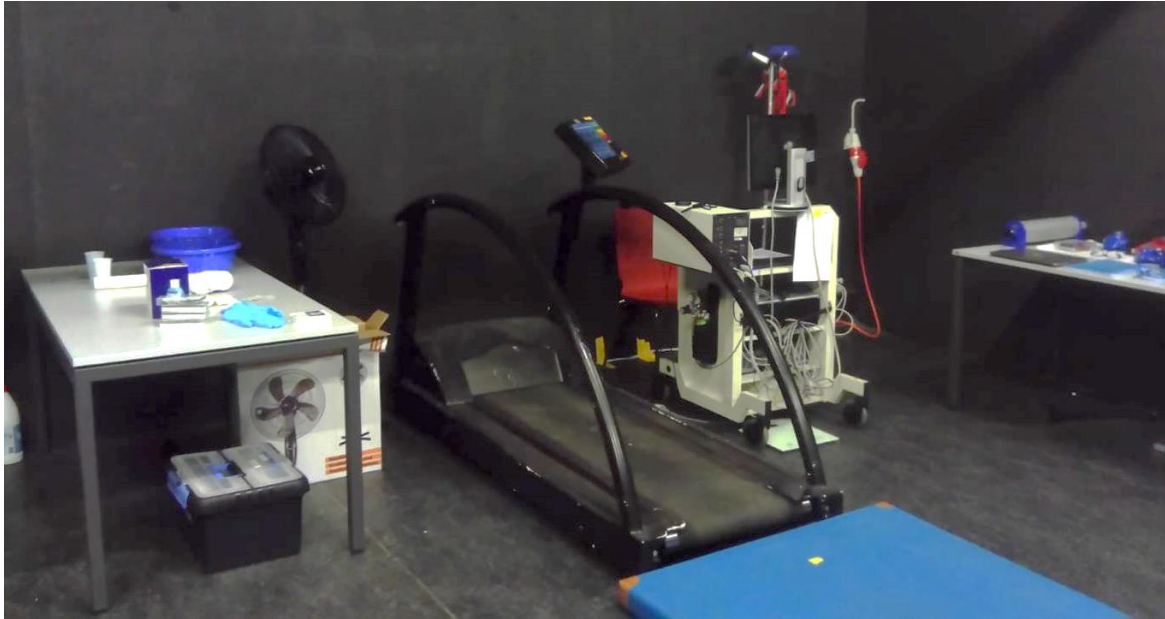


Figure 6. Laboratoire COPLAB.

Concernant, la course Saillon – Ovronnaz, nous avons utilisé les supports suivant afin de récolter les données du parcours et les résultats de nos sujets.

- Chronométrage officiel de la course : VS-Timing
- Données GPS du parcours par Swiss Topo
- Données GPS des montres connectées des sujets
- Echelle de Borg



Figure 7. Course Saillon – Ovronnaz.

2.5 Interventions

Lors de l'étude, nous sommes intervenus dans 3 différents domaines avec les appareils de mesure. Tout d'abord avec l'appareil de spirométrie pour la $VO_2\text{max}$, puis la ceinture abdominale pour la FC et un appareil de mesure du lactate sanguin.

2.5.1 $VO_2\text{max}$. L'appareil de spirométrie mesure les échanges gazeux de l'athlète chaque 10 secondes. En fin de test, les données brutes étaient exportées afin d'établir la courbe de VO_2 et d'obtenir la $VO_2\text{max}$ de chacun des sujets.

2.5.2 Fréquence cardiaque. La ceinture abdominale utilisée pour ces tests prélevait les battements des sujets chaque seconde sur le système Polar Beat. Afin de superposer les résultats de la consommation d'oxygène et de FC, nous avons créé un document Microsoft Excel permettant d'exporter seulement les battements à des intervalles de 10 secondes.

2.5.3 Lactate. Concernant la prise du lactate, nous l'avons effectuée chaque 5 minutes afin de pouvoir retranscrire la courbe sur le même graphe que les deux précédentes données.

2.5.4 Données sujets. Lorsque toutes ces données étaient récoltées, nous avons créé un document Excel afin de produire un graphe. Ce dernier était remis aux sujets et offrait un bon compte rendu de leur état de forme. De plus, ce document leur offrait la possibilité d'exploiter leurs données pour des futurs objectifs.

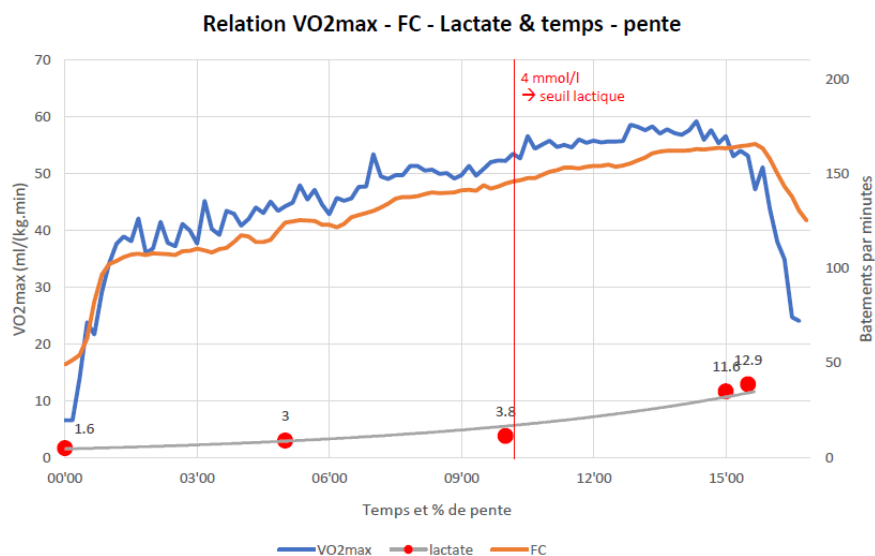


Figure 8. Graphe personnalisé en fonction des données du test « trail ».

3 Résultats

Dans un premier temps, nous présenterons les résultats des prédictions pré-course qui se basent sur le test « trail » et les différentes équations proposées par les physiologistes du sport. Dans un second temps, nous traiterons des prédictions post-course étalonnées par des coefficients basés sur les résultats.

3.1 Validité des expérimentations

Les résultats des deux expérimentations à effort maximal peuvent être validés par les valeurs ci-après. Au sein des figures 9 et 10, les données des sujets sont représentées par les différents points. Quant à la limite minimale à atteindre pour approuver la performance, elle est symbolisée par la ligne rouge. Pour valider le test en laboratoire, il fallait un minimum de 9 mmol/L pour le lactate sanguin et de 1.10 pour le quotient respiratoire. Le détail complet des résultats se trouve dans les annexes.

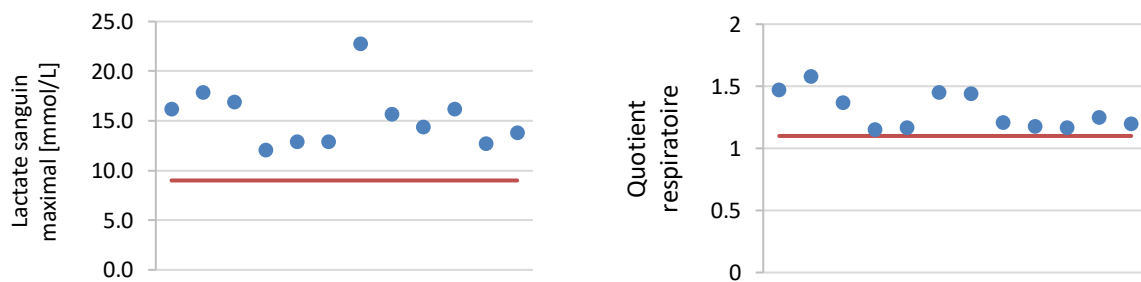


Figure 9 et 10. Valeurs finales de lactate sanguin et valeurs maximales du quotient respiratoire.

L'intensité fournie par les sujets lors de la course a démontré également de bonnes valeurs sur l'échelle de Borg. La figure 11 indique la perception de l'effort pour chacun de coureurs. Cette dernière était mesurée à l'arrivée et possède une moyenne de 7.92 sur 10 avec un écart type de 0.79.

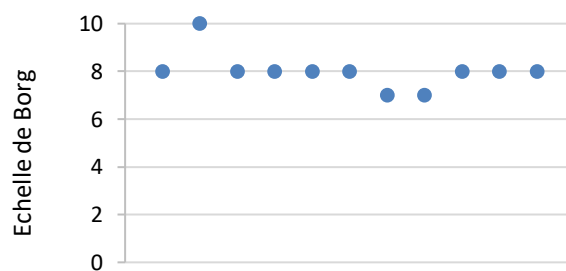


Figure 11. Perception de l'effort selon l'échelle de Borg.

3.2 Prédiction par la distance équivalente à plat

Comme vu dans l'introduction, de nombreux physiologistes de l'exercice proposent des estimations de temps pour différentes distances à plat. Ces prédictions se basent sur les valeurs de $VO_2\text{max}$ ainsi que de VMA. En fonction de ces tableaux, nous avons évalué le temps de course pour chacun des sujets.

Tout d'abord, la distance équivalente à plat était calculée sur la base de l'équation proposée à la section 1.2.2. Pour la course Saillon – Ovronnaz, elle est de 15,02 kilomètres pour 852 mètres de dénivellation positive sur 6.5 kilomètres (2,73 kilomètres possèdent un dénivelé nul ou négatif).

$$15.02 = 6.5 + \frac{852}{100}$$

Ensuite, pour trouver l'estimation du temps selon les tabelles, il était nécessaire de trouver la VMA théorique correspondante à la valeur de $VO_2\text{max}$ personnelle. Pour cela, nous avons utilisé la valeur moyenne basée sur les tableaux de Gindre et Léger & Mercier afin d'obtenir la meilleure VMA possible (*tableau 7*).

Tableau 7

Rapport VMA - $VO_2\text{max}$ et prédiction de temps en fonction de la VMA

| VMA théorique | Moyenne $VO_2\text{max}$ [mmol/L] | Léger $VO_2\text{max}$ [mmol/L] | Gindre $VO_2\text{max}$ [mmol/L] | Sujet | VMA | 15 000m Gindre [sec] | 15 000m Léger Mercier [sec] |
|---------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|------------|-------|----------------------|-----------------------------|
| 13.50 | 45.63 | 47.25 | 44.00 | S12 | 13.50 | 4800 | * |
| 14.00 | 47.50 | 49.00 | 46.00 | S10, S11 | 14.00 | 4620 | 5243 |
| 14.50 | 49.38 | 50.75 | 48.00 | | 14.50 | 4470 | 4985 |
| 15.00 | 51.25 | 52.50 | 50.00 | S9 | 15.00 | 4320 | 4726 |
| 15.50 | 53.13 | 54.25 | 52.00 | | 15.50 | 4185 | 4514 |
| 16.00 | 55.00 | 56.00 | 54.00 | | 16.00 | 4050 | 4302 |
| 16.50 | 56.88 | 57.75 | 56.00 | | 16.50 | 3923 | 4125 |
| 17.00 | 58.75 | 59.50 | 58.00 | S6 | 17.00 | 3795 | 3947 |
| 17.50 | 60.63 | 61.25 | 60.00 | S5, S7, S8 | 17.50 | 3688 | 3797 |
| 18.00 | 62.50 | 63.00 | 62.00 | | 18.00 | 3580 | 3647 |
| 18.50 | 64.38 | 64.75 | 64.00 | S4 | 18.50 | 3480 | 3518 |
| 19.00 | 66.25 | 66.50 | 66.00 | S3 | 19.00 | 3380 | 3389 |
| 19.50 | 68.13 | 68.25 | 68.00 | | 19.50 | 3280 | 3277 |
| 20.00 | 70.00 | 70.00 | 70.00 | | 20.00 | 3180 | 3165 |
| 20.50 | 71.88 | 71.75 | 72.00 | S1 | 20.50 | 3093 | 3067 |
| 21.00 | 73.75 | 73.50 | 74.00 | | 21.00 | 3005 | 2969 |
| 21.50 | 75.63 | 75.25 | 76.00 | S2 | 21.50 | 2920 | 2883 |

*Aucune donnée pour une VMA de 13.50

La VMA théorique calculée par les deux estimations de temps se déterminent à travers la correspondance donnée par les tabelles de Gindre et celles de Léger & Mercier du tableau 7.

Dans le prochain tableau, nous présentons tout d'abord les erreurs relatives et absolues entre les prédictions et le temps réel de la course, puis les valeurs moyennes des erreurs dans l'histogramme.

Tableau 8

Erreur absolue et relative des prédictions de Gindre et Léger & Mercier

| Sujet | Temps course | Gindre | | | Léger & Mercier | | |
|---------------------------|--------------|--------------------|----------------------|---------------------|--------------------|----------------------|---------------------|
| | [sec] | Temps prédit [sec] | Erreur absolue [sec] | Erreur Relative [%] | Temps prédit [sec] | Erreur absolue [sec] | Erreur relative [%] |
| S1 | 3073 | 3093 | 20 | 0.65 % | 3067 | 6 | 0.20 % |
| S2 | 3122 | 2920 | 202 | 6.47 % | 2883 | 239.5 | 7.67 % |
| S3 | 3367 | 3380 | 13 | 0.39 % | 3389 | 22 | 0.65 % |
| S4 | 3524 | 3480 | 44 | 1.25 % | 3518 | 6 | 0.17 % |
| S5 | 3559 | 3688 | 129 | 3.62 % | 3797 | 238 | 6.69 % |
| S6 | 3568 | 3795 | 227 | 6.36 % | 3947 | 379 | 10.62 % |
| S7 | 3707 | 3688 | 19 | 0.51 % | 3797 | 90 | 2.43 % |
| S8 | 3874 | 3688 | 186 | 4.80 % | 3797 | 77 | 1.99 % |
| S9 | 4262 | 4320 | 58 | 1.36 % | 4726 | 464 | 10.89 % |
| S10 | 4569 | 4620 | 51 | 1.12 % | 5243 | 674 | 14.75 % |
| S11 | 4641 | 4620 | 21 | 0.45 % | 5243 | 602 | 12.97 % |
| S12 | 5653 | 4800 | 853 | 15.09 % | * | * | * |
| Moyenne | | 3841.00 | 151.92 | 3.51 % | 3946.05 | 254.31 | 6.28 % |
| Ecart-type | | 616.86 | 234.23 | 4.31 % | 802.28 | 243.46 | 5.46 % |
| P-Value (erreur absolue) | | | 0.02 | | | | |
| P-Value (erreur relative) | | | 0.05 | | | | |

*aucune donnée pour une VMA de 13.50

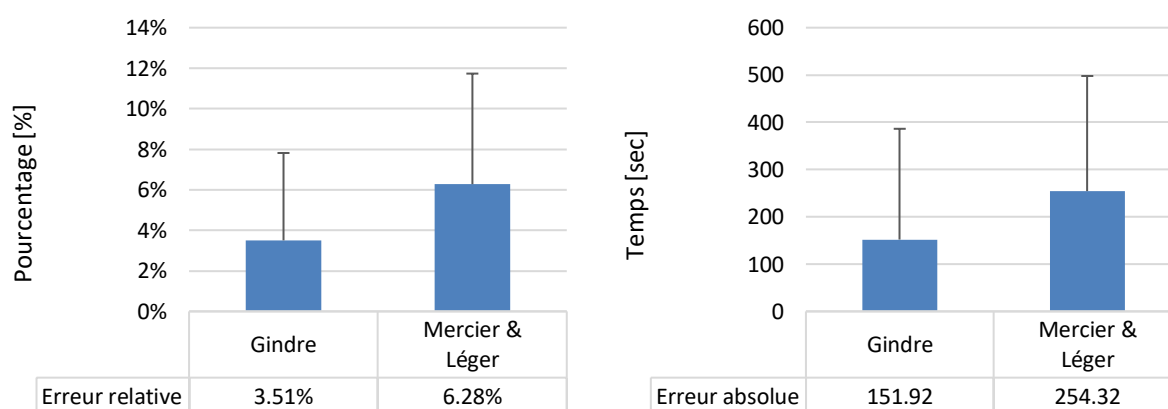


Figure 12 et 13. Prédiction de la course : moyenne d'erreur relative et moyenne d'erreur absolue.

Il est également possible de présenter les résultats sous la forme d'un diagramme de dispersion illustrant la différence de temps entre les deux prédictions et la réalité.

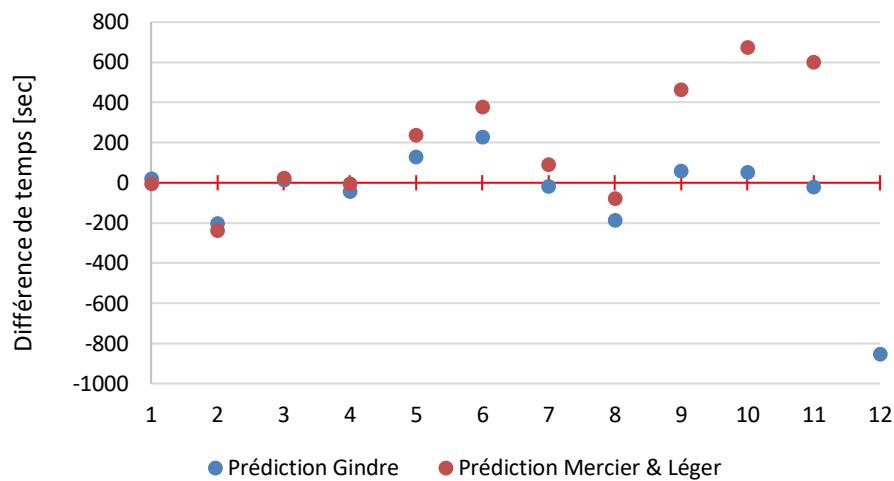


Figure 14. Erreur absolue des prédictions de performance pour les deux méthodes.

3.3 Explication du temps de course à partir de la $VO_2\text{max}$

Une régression non linéaire a été calculée pour déterminer le temps de course à partir de la variable indépendante $VO_2\text{max}$. Cette régression est exprimée par la fonction : $t = f(VO_2\text{max})$.

$$t = y = 5.389270548 \cdot 10^{-6} x^2 - 5.766269588 \cdot 10^{-2} x + 199.6682847,$$

avec y représentant le temps de prédiction t et x la variable indépendante $VO_2\text{max}$.

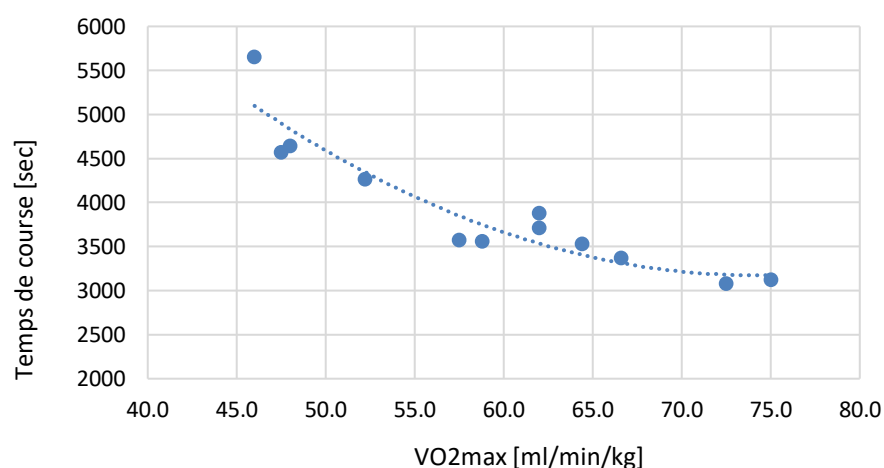


Figure 15. Temps de course en fonction de la $VO_2\text{max}$.

Tableau 9

Résultats de la relation entre temps de course et VO₂max

| | | | |
|--------------------------------|----------|-------------------------|----------|
| Moyenne VO ₂ max | 59.37 | Moyenne temps course | 3909.92 |
| Ecart type VO ₂ max | 9.59 | Ecart type temps course | 749.46 |
| Taille de l'échantillon | 12.00 | R | -0.90*** |
| P-Valeur | 7.73E-05 | R carré | 0.92 |

3.4 Relation entre vitesse ascensionnelle du test et de la course

Ci-dessous, nous mesurons la corrélation entre la vitesse ascensionnelle du test et celui de la course par un test statistique. L'expérimentation de terrain et celle en laboratoire seront confrontés afin de déterminer les éventuels liens coexistant entre les deux milieux. La fonction recherchée est : $V_{Acourse} = f(V_{Atest})$. Nous nous attendions à obtenir une équation où $y = x$ cependant cela n'a pas été le cas puisque du bruit a altéré les données.

$$y = 0.9822 \cdot x + 182.1$$

avec $x = V_{Atest}$.

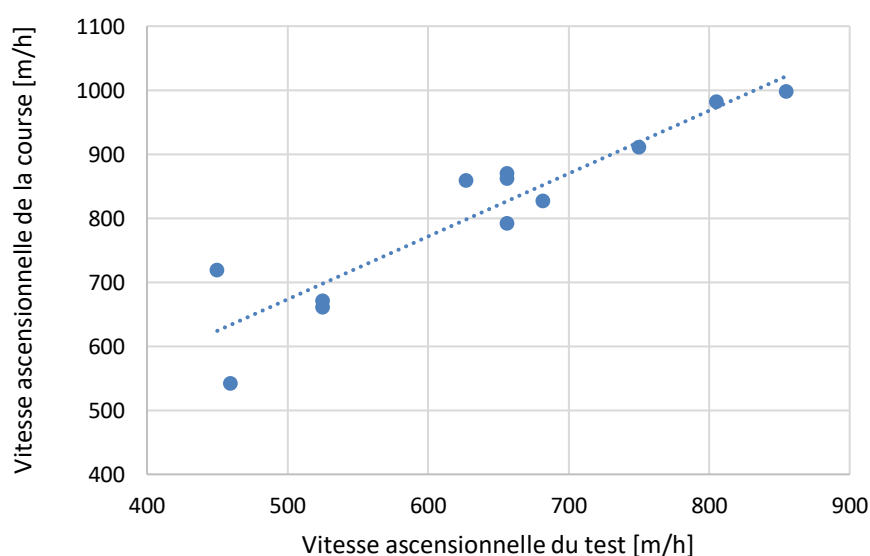


Figure 16. Rapport entre la VA du test et celle de la course.

Tableau 10

Résultats de la relation entre vitesse ascensionnelle du test et de la course

| | | | |
|-------------------------------|----------|---------------------------------|---------|
| Moyenne V _{Atest} | 637.30 | Moyenne V _{Acourse} | 808.10 |
| Ecart-type V _{Atest} | 129.13 | Ecart-type V _{Acourse} | 136.79 |
| Taille de l'échantillon | 12.00 | R | 0.93*** |
| P-Valeur | 1.42E-05 | R carré | 0.86 |

3.5 Explication du temps de course par la vitesse ascensionnelle de la course

Le dernier diagramme proposé à une variable indépendante cherche à expliquer le temps de course à partir de la vitesse ascensionnelle de la course. Nous ne nous intéressons pas à la qualité de prédiction de ce modèle de régression car il est logique qu'il soit tout proche des 100 %. Nous avons plutôt dirigé notre attention sur la courbe de tendance. Nous recherchons ainsi la fonction : $t = f(VA_{course})$.

$$t = y = 4.145298705 \cdot 10^{-5} x^2 - 5.345324608 \cdot 10^{-1} x + 2243.001781$$

avec $x = VA_{course}$.

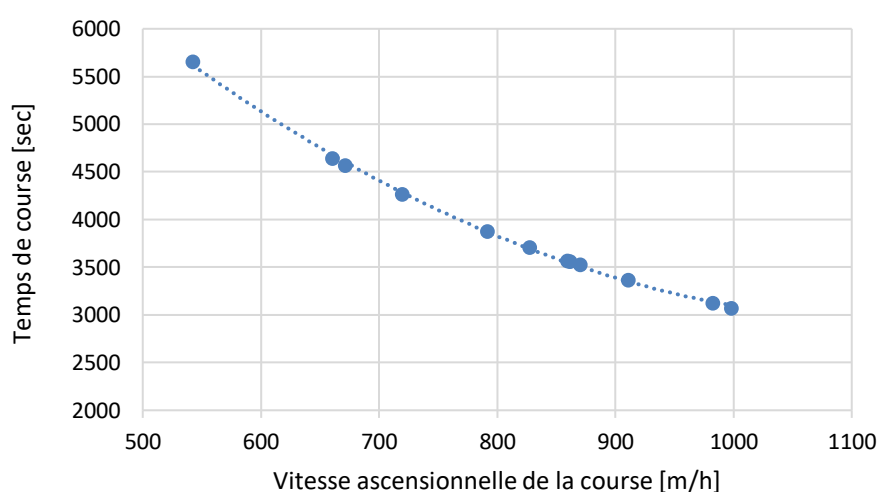


Figure 17. Temps de course en fonction de la VA de la course.

Tableau 11

Résultats de la relation entre temps de la course et vitesse ascensionnelle de la course

| | | | |
|--------------------------------|----------|-------------------------|----------|
| Moyenne VO ₂ max | 808.07 | Moyenne temps course | 3909.92 |
| Ecart type VO ₂ max | 136.80 | Ecart type temps course | 749.46 |
| Taille de l'échantillon | 12.00 | R | -0.98*** |
| P-Valeur | 1.32E-08 | R carré | 0.99 |

Ce diagramme est intéressant d'abord parce qu'il montre clairement une relation non linéaire mais également car sa courbe de régression fournit une explication à la prochaine relation.

3.6 Explication du temps de course à partir de la vitesse ascensionnelle du test

Dans le diagramme suivant, nous calculons la capacité prédictive d'un modèle de régression non linéaire à estimer le temps de course à partir de la vitesse ascensionnelle du test. Une nouvelle fois, la courbe de régression est non linéaire. Le modèle semble être d'autant plus

fiable que le coureur est rapide. Pour cela, nous recherchons la fonction f où $t = f(VA_{test})$.

$$t = y = 7.97597169 \cdot 10^{-3} x^2 - 15.29392915 x + 10295.319$$

avec $x = VA_{test}$.

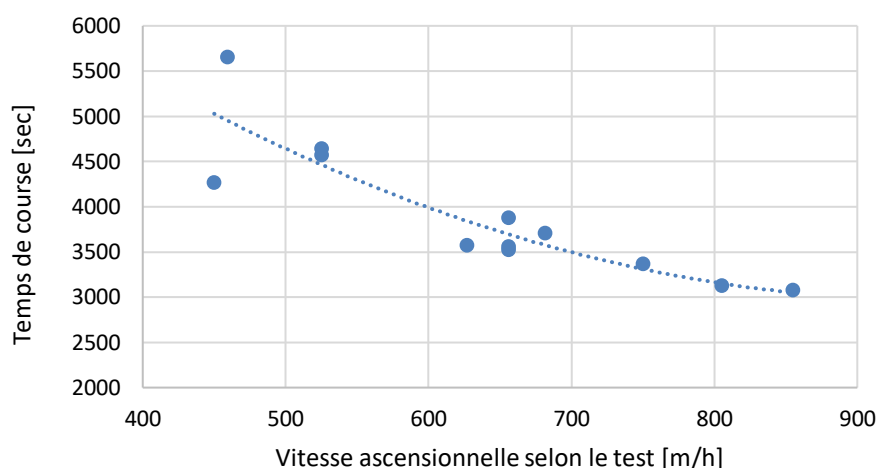


Figure 18. Temps de course en fonction de la vitesse ascensionnelle.

Tableau 12

Résultats de la relation entre temps de course et vitesse ascensionnelle du test

| | | | |
|-------------------------------|----------|-------------------------|---------|
| Moyenne VA _{test} | 637.30 | Moyenne temps course | 3909.90 |
| Ecart-type VA _{test} | 129.13 | Ecart-type temps course | 749.46 |
| Taille de l'échantillon | 12.00 | R | -0.87 |
| P-Valeur | 2.19E-04 | R carré | 0.79 |

3.7 Explication du temps de course à partir de la vitesse ascensionnelle de la course et de la VO₂max

Pour terminer, nous avons réalisé un dernier test statistique de prédiction de temps basé sur les résultats obtenus lors de la course. Deux variables indépendantes : VO₂max et VA ont été utilisées afin d'établir une relation linéaire avec le temps de course.

Il s'agit donc de trouver la fonction f qui calcule t à partir de VO₂max et VA :

$$t = f(VO_{2max}, VA)$$

Le calcul de la régression linéaire donne les résultats suivants :

D'une part le R^2 est de 0.97 avec 133 secondes d'erreur ce qui montre que notre modèle est efficace pour prédire un temps de course sur une course d'environ une heure. Ceci s'explique amplement par le profil de la course qui est essentiellement en montée.

Tableau 13

Résultats de la relation entre temps de course, vitesse ascensionnelle de la course et VO₂max

| | | | |
|-------------------------|-------------------------------|--------------------|------|
| Taille de l'échantillon | 12 | Adjusted R-squared | 0.96 |
| P-Valeur | 7.25E-08 | R carré | 0.97 |
| F-statistic | 169.2 on 2 and 9 DF | | |
| Residual standard error | 133.4 on 9 degrees of freedom | | |

De plus, l'étude des coefficients montre que la variable VA a nettement plus de valeur pour estimer une valeur de temps que VO₂max. Voici les coefficients pour chacune d'entre elles :

Tableau 14

Coefficients

| | Estimate | Std. Error | T-value | Pr(> t) |
|--------------------------|----------|------------|---------|--------------------|
| (Intercept) | 8125.61 | 251.93 | 32.25 | 1.30E-10*** |
| VO₂max | 22.83 | 12.80 | 1.78 | 0.108 |
| VA | -6.89 | 0.90 | -7.68 | 3.06E-05*** |

Enfin, le modèle calculé par la régression donne comme équation :

$$t = 8125.610427 + 22.832051 \times VO2max - 6.894564 \times VA$$

Les valeurs inscrites dans le tableau et illustrées dans le graphe ci-dessous ont été calculées de manière que la valeur du sujet recherchée soit enlevée de l'échantillon testé pour utiliser uniquement les autres données afin de trouver la prédiction de temps pour le sujet en question.

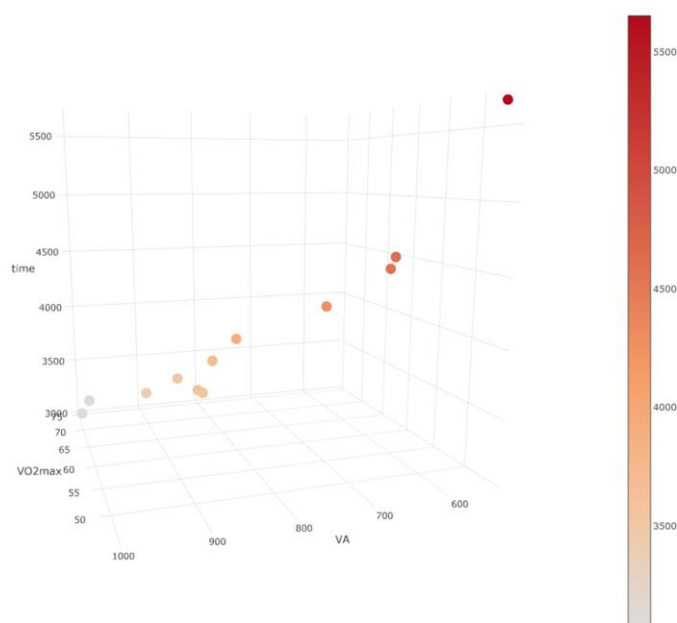


Figure 19. Temps de course en fonction de la VO₂max et de la VA de course.

Tableau 15

Erreurs de prédiction du temps de course à partir du modèle de régression multivarié non linéaire basé sur la vitesse ascensionnelle et la VO₂max

| id | Erreur absolue [sec] | Erreur relative [%] | Temps réel [sec] | Temps prédit [sec] |
|------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| S1 | 125.90 | 4.27 % | 3073 | 2947.11 |
| S2 | 65.12 | 2.04 % | 3122 | 3187.12 |
| S3 | 11.59 | 0.35 % | 3367 | 3355.41 |
| S4 | 94.95 | 2.62 % | 3524 | 3618.95 |
| S5 | 1.84 | 0.05 % | 3559 | 3557.16 |
| S6 | 39.74 | 1.13 % | 3568 | 3528.26 |
| S7 | 68.10 | 1.80 % | 3707 | 3775.10 |
| S8 | 119.07 | 2.98 % | 3874 | 3993.07 |
| S9 | 39.58 | 0.92 % | 4262 | 4301.58 |
| S10 | 17.20 | 0.38 % | 4569 | 4551.80 |
| S11 | 29.24 | 0.63 % | 4641 | 4670.24 |
| S12 | 518.22 | 10.09 % | 5653 | 5134.78 ⁽¹⁾ |
| Moyenne | 94.21 | 2.27 % | | |
| Ecart-type | 139.61 | 0.03 | | |

(1) projection calculée en fonction des autres données trop éloignée des valeurs de S12

4 Discussion

Les estimations de performance réalisées dans cette étude ont démontré des résultats positifs. Malgré les difficultés que représentait le domaine de la course à pied de montagne, les deux types de méthodes étudiées dans ce travail ont donné des résultats fiables : (1) $<5\%$ d'erreur moyenne à partir de la VMA reportée sur une distance équivalent plat et (2) $<3\%$ d'erreur moyenne à partir des performances des autres coureurs dans le contexte spécifique d'une course donnée. Cependant, la démarche (2) ne peut s'appliquer à d'autres parcours puisqu'elle a été spécifiquement conçue pour cette course indépendamment des critères relatifs au profil du tracé.

4.1 Validité des expérimentations

Selon les critères de validité des tests d'effort maximal proposés par le Docteur en biologie de l'activité musculaire Georges Cazorla, notre expérimentation en laboratoire du test « Trail » de la CRR – SUVA s'avère valide. Chacun des sujets a dépassé le seuil de validité des 9 mmol/L pour le lactate sanguin et possède un quotient respiratoire supérieur à 1.10.

Quant au test de terrain que nous avons réalisé à travers la course Saillon – Ovronnaz, nous pouvons valider les performances des athlètes par le résultat de la perception de l'effort à l'arrivée. Avec une moyenne de 7.92 et un écart-type de 0.79, tous les sujets ont approché l'effort maximal représenté par 10 sur l'échelle de Borg modifiée.

Pour donner suite à la validation des expérimentations, nous interpréterons les résultats en deux parties : prédiction pré-course et post-course. La première d'entre elles propose une estimation du temps de course par les différentes données récoltées par le test et la méthode d'équivalence à plat. La seconde s'intéresse aux relations entre les résultats des performances du test de terrain et du test en laboratoire.

4.2 Prédiction de performance

Afin de prédire le temps des sujets, nous avons eu recours à l'équation de Saugy et al. (2013) permettant de trouver l'équivalence à plat du parcours Saillon – Ovronnaz ainsi que des tables de prédiction d'une course de 15 kilomètres proposées par Gindre et Léger & Mercier.

4.2.1 Prédiction selon Gindre. Pour une durée de course moyenne de 65 minutes et 10 secondes, la première méthode présente de bons résultats avec un taux moyen d'erreur absolue de 2 minutes et 31 secondes (3.51 % d'erreur relative) et un écart type de 3 minutes et 54

secondes. Cependant, une valeur contraste fortement avec les données du reste de l'échantillon et influence notre résultat global. Il s'agit du sujet n°12. Sans cette valeur distante, la moyenne d'erreur absolue s'abaisse à 1 minute 28 secondes pour un écart type de 1 minute 22 secondes.

4.2.2 Prédiction selon Léger & Mercier . La deuxième méthode expose de moins bons résultats mais tout de même satisfaisants. L'erreur absolue moyenne est de 4 minutes et 14 secondes, ce qui représente 6.28 % d'erreur relative pour un écart type de 4 minutes et 3 secondes.

Cette deuxième table donne des prédictions inférieures à 60 secondes d'erreur pour 3 personnes seulement contre 7 pour les estimations de Gindre. De même que pour les valeurs extrêmes, 6 personnes ont une sur- ou sous-estimation de 3 minutes et 58 secondes alors que pour la première méthode, seul un sujet dépasse cette valeur. Ces différences peuvent être expliquées par l'ancienneté de l'étude de Léger & Mercier datant de 1983. Les performances auraient évolué et les valeurs proposées par les scientifiques canadiens ne seraient plus adaptées à l'ère du temps. Quant aux estimations de Gindre datant de 2013, leur précision serait expliquée par le fait qu'elles sont une compilation de plusieurs études.

Un autre facteur influençant négativement les estimations est la conversion de la $VO_2\text{max}$ en vitesse maximale aérobie pour obtenir la valeur de prédiction. Cet intermédiaire aurait pu être évité par la mesure réelle de la VMA des athlètes. Malheureusement, avec le test « trail », le calcul direct de la VMA ne pouvait s'effectuer puisque l'expérience se déroule à une allure constante. De ce fait, il permet uniquement de mesurer les échanges gazeux de l'athlète.

Avec les résultats obtenus par notre méthode utilisant la table de Gindre et l'équation d'équivalence à plat, nous pouvons confirmer les estimations de temps proposées par l'auteur ainsi qu'attester la validité de l'équation avancée par les auteurs Saugy et al. (2013). De plus en estimant des performances en course de montagne sur la base de prédiction à plat, nous pouvons confirmer les corrélations présentées par l'étude de Balducci et al. (2016) et celle de Lacroix (2018a) entre les valeurs individuelles de $VO_2\text{max}$ à plat et en montée.

4.3 Relation entre les performances de la course et du test

Après avoir prédit les temps de course des sujets et contrôler leur performance sur le parcours, nous pouvons analyser et comparer les valeurs récoltées en laboratoire et sur le terrain.

4.3.1 VO₂max, un indicateur de performance fiable. D'après notre diagramme de dispersion (*figure 15*), il existe un lien statistique entre les deux variables : temps et VO₂max. La qualité de prédiction de ce modèle était de $R^2 = 0.92$ (P-Value = 7.73E-05). Ce coefficient de détermination informe que la VO₂max est un bon indicateur de performance et confirme les conclusions des recherches de Billat et al. (2001) et d'Anderson (2013). Dans leurs études, le signe négatif du coefficient de corrélation (r) indique que plus les valeurs de VO₂max sont hautes, plus petits sont les temps de course et donc meilleures sont les performances. Néanmoins comme dit en introduction, la valeur brute de VO₂max n'est pas l'unique facteur déterminant du résultat. Evidemment qu'il est nécessaire de posséder une grande capacité de consommation mais il est aussi indispensable de disposer la faculté à la maintenir dans le temps. De plus, dans un niveau d'expertise élevé, les différents facteurs physiologiques, biomécaniques et psychologique possèdent également un rôle déterminant comme l'annonçait l'étude de Conley & Krahenbuhl (1980) ou celle de Balducci et al. (2016). Ce phénomène est illustré par les sujets S7 et S8 qui possèdent tous les deux la même valeur de VO₂max à 62 ml/min/kg mais pas le même temps de course.

4.3.2 La vitesse ascensionnelle. Comme le montre la figure 16, la corrélation entre les valeurs de vitesse ascensionnelle du test et celles de la course ont obtenu un R de 0.93 et un R^2 d'une régression linéaire de 0.86 (P-Value = 1.43E-05). Dans cette analyse statistique, nous aurions pu nous attendre à obtenir une équation où $y = x$. Cependant, ce n'est pas le cas et nous pouvons conclure qu'il existe du bruit entre les deux valeurs.

La mesure suivante réalisée (*figure 17*) explique le temps de course à partir de la vitesse ascensionnelle. La qualité de prédiction de cette régression est logiquement élevée avec un $R^2 = 0.99$ (P-Value = 1.32E-08). Cependant, une constatation intéressante concernant le niveau d'expertise peut se faire à partir de la courbe de tendance. Plus un athlète possède une faible valeur de vitesse ascensionnelle, plus la progression de cette dernière influencera la performance. Autrement dit, la marge de progression d'un amateur serait supérieure et plus rapide qu'un expert. Cette relation non-linéaire couplée à la précédente relation annonce fortement le résultat de la prochaine analyse statistique.

La figure 18 met en lien la vitesse ascensionnelle définie par le test avec le temps de course. Cette relation a montré que la vitesse ascensionnelle est une variable qui explique dans notre contexte fortement le temps de course : $R^2 = 0.79$ (P-Value = 2.19E-04). Nous remarquons dans ce diagramme que plus la vitesse ascensionnelle de l'athlète est grande, plus l'écart type à la courbe est faible ; ce qui sous-entend une meilleure prédiction pour les athlètes avec une

VA élevée. Concernant les sujets possédant une vitesse ascensionnelle plus faible, il existe une plus grande disparité entre les valeurs.

4.3.3 Vitesse ascensionnelle de la course et VO₂max. Des conclusions intéressantes ont également été proposées par la combinaison des deux variables indépendantes proposées individuellement dans la section ci-dessus. Pour réaliser cela, nous avons effectué une régression entre le temps de course et les variables que sont la VO₂max et la vitesse ascensionnelle de la course. L'erreur relative s'élevant à 2.27 % pour un R² de 0.97 (P-value = 7.25E-08) démontre un modèle efficace dans le contexte de prédiction pour une même course. Cette modélisation est fortement intéressante puisqu'elle mêle deux paramètres de course contrairement aux précédentes relations. Etant donné que cette erreur est calculée pour un échantillon vis-à-vis des autres échantillons du jeu de données (i.e., l'échantillon en question était retiré des tests), il est intéressant de constater que pour une course donnée de ce type, il est possible à travers la VO₂max et la vitesse ascensionnelle de prédire efficacement un temps de course en fonction de résultats antérieurs de cette même course. En comparaison des précédents modèles univariés, cet ajout amène de la précision aux calculs et de ce fait offre le meilleur modèle de prédiction de notre travail (hormis la relation logique entre le temps de course et la vitesse ascensionnelle prédite sur ce dernier).

4.4 Réponse à la question de recherche

Par les diverses recherches et analyses effectuées durant ce travail, Nous pouvons dès à présent répondre à nos deux questions de recherche.

La première d'entre elles se demandait s'il existait une interprétation possible et individualisée des résultats obtenus par le test « trail » de la CRR – SUVA permettant de prédire une performance en course à pied de montagne. La méthode dont nous avons eu recours démontre qu'il existe plusieurs relations intéressantes entre le test « trail » et les performances de la course Saillon – Ovronnaz. Bien que les diverses analyses statistiques soient significatives et présentent de forts pouvoirs prédictifs, ce modèle ne s'applique pas à tous les athlètes. Nous avons pu le remarquer par les valeurs distantes et isolées des sujets (exemple ou conféré ...).

La deuxième question abordait l'éventualité de transposer le modèle de prédiction de la course Saillon – Ovronnaz créé sur la base du test « trail » à d'autres parcours de course de montagne. Notre meilleur modèle de prédiction a été établi à la suite de la prise de connaissance des résultats de la course afin de procéder à un étalonnage. De ce fait, il paraît complexe de pouvoir transposer ce modèle à d'autres courses de montagne puisque certains paramètres

du calcul de notre prédiction proviennent des données du parcours. Pour pouvoir bénéficier de la même méthode, il serait donc nécessaire d'apporter différentes adaptations pour prédire les performances d'autres compétitions. Il s'agirait en particulier de reproduire cette étude sur une vingtaine de courses pour introduire dans les modèles de régression les caractéristiques propres aux terrains (par exemple : équivalence plat, dénivelé positif et négatif).

Notre étude a prouvé qu'il existe une possibilité de prédire une performance sur un parcours présentant une pente régulière avec peu de variables techniques de deux différentes manières. Ces dernières sont l'utilisation des échelles d'équivalence à plat proposées par Gindre et Léger & Mercier ainsi que par l'apprentissage d'un modèle spécifique à la course. Seules quelques adaptations sont nécessaires afin d'ajuster notre estimation de performance. Il reste que sur un parcours davantage sélectif en matière de variables techniques, le modèle d'équivalence à plat de Gindre et Léger & Mercier serait difficilement applicable.

4.5 Forces et limites de l'étude

La prédiction de performance en course de montagne par les différentes valeurs mesurées lors du test « trail » de la SUVA – CRR s'est avérée concluante pour notre étude. Les prédictions ont démontré des valeurs proches de la réalité (3.51 % d'erreur relative pour Gindre et 6.28 pour Léger & Mercier, respectivement 151,92 et 254.32 secondes sur le réel temps de course). Cependant, si notre modèle de régression doit pouvoir s'appliquer à d'autres courses, la principale limite de cette méthode est l'impossibilité de l'utiliser tel que paramétré (i.e., avec l'apprentissage donné ici) à d'autres parcours de courses de montagne dans l'état. Comme nous l'avons observé au début de ce travail, les nombreux facteurs naturels influençant les performances en course de montagne ne permettent pas l'application de notre modèle à d'autres parcours.

La course sélectionnée pour cette étude possédait une pente régulière ainsi qu'un parcours peu technique permettant une bonne estimation par un test réalisé sur un tapis roulant. Un parcours présentant une configuration plus accidentée et plus complexe avec diverses relances aurait probablement entraîné un biais plus grand. La limite majeure de ce travail est donc de ne pas avoir testé notre modèle sur plusieurs courses. D'autres limites concernant le test ont également influencé certains résultats. L'inaccoutumance de la course sur tapis roulant ou le port du masque collectant les échanges gazeux pourrait être une source de dérangement durant l'effort de l'athlète. Nous avons pu l'expérimenter avec un sujet qui a stoppé son effort à l'entrée du 3^{ème} palier. Lorsque l'intensité augmentait, ce dernier s'est senti oppressé par le masque et a perdu ses moyens. De plus, l'atmosphère du laboratoire se situant au sous-sol,

sans aération ni fenêtre, n'offrait peut-être pas le meilleur environnement pour atteindre ses valeurs maximales.

Le principal bienfait de l'étude est sans doute l'utilisation de test « trail ». Le calcul de sa $VO_2\text{max}$ sur un tapis de course présentant de la dénivellation se rapproche au plus proche de la réalité des courses de montagne. Bien que la $VO_2\text{max}$ soit fortement corrélée entre le plat et la pente, il est intéressant de mesurer cette donnée dans les conditions les plus réelles possibles.

5 Conclusion

Pour conclure, la littérature offre de nombreuses pistes concernant la prédiction de résultats en course à pied (i.e., Léger & Mercier, 1983). Cependant, elle traite essentiellement des courses à plat et reste discrète quant à l'estimation de temps sur les courses de montagne. Malgré la rareté des études traitant du sujet, elles proposent tout de même d'intéressants moyens pour aboutir à des conclusions pertinentes.

Nous avons émis l'hypothèse que notre étude aurait de grande difficulté à prédire les performances en course de montagne et que seule la vitesse ascensionnelle pourrait offrir des valeurs proches de la réalité. A notre grande surprise, les résultats obtenus pour la course Saillon – Ovronnaz par le test « trail » de la Clinique Romande de Réadaptation – SUVA s'avèrent être proches de la réalité. Pour arriver à ces résultats significatifs, nous avons utilisé en premier lieu la méthode d'équivalence à plat ainsi que les tables de prédictions basées sur la vitesse maximale aérobie des sujets. Pour un temps de course moyen de 3909.92 secondes, cette démarche offrait des résultats avec une moyenne d'erreur relative de 3.51 % avec les tables du physiologiste Gindre et de 6.28 % pour les tables de Léger & Mercier. Les résultats de cette méthode ont remarquablement fonctionné. En deuxième lieu, nous avons procédé à la réalisation de la course Saillon - Ovronnaz afin d'obtenir d'autres valeurs et de les mettre en relation avec celles récoltées durant le test. Tout d'abord, nous avons vérifié la corrélation entre la VO_2max et les performances. Cette dernière présentait une qualité de prédiction intéressante avec un $R^2 = 0.92$ dans le contexte d'une course donnée. Ensuite, nous avons analysé les corrélations ($R^2 = 0.86$) entre les vitesses ascensionnelles du test de terrain et celles du test en laboratoire. Elles ont permis d'indiquer que le terrain possède peu d'impact sur les performances. Toujours avec la vitesse ascensionnelle du test, d'abord nous l'avons mise en relation avec celle du test, puis avec le temps de course où elle donna un coefficient de détermination, respectivement de 0.99 et de 0.79. Les courbes de régression de ces deux derniers digrammes démontrent que la prédiction de performance chez un athlète de niveau amateur est moins précise que chez un expert. Enfin dans un modèle en 3 dimensions, une explication du temps de course par rapport à la vitesse ascensionnelle de course et à la VO_2max a été proposée. Cette dernière mesure a donné un R^2 de 0.97 ce qui démontre le haut pouvoir prédictif de ce modèle.

Par ces résultats, nous pouvons répondre à nos questions de recherche et affirmer qu'il est possible de présenter un modèle individualisé de prédiction de performance en course de montagne. Néanmoins, bien que non testé ici, il paraît nécessaire d'adapter la modélisation

avec les différents paramètres de parcours pour chacune des courses. Sans la prise en compte de ces paramètres, ou à travers l'élaboration d'un modèle de régression propre à chaque course, il ne paraît pas possible d'obtenir des résultats significatifs. Finalement, notre recherche démontre l'importance d'intégrer plusieurs facteurs dans son modèle de prédiction (le modèle basé sur la $VO_2\text{max}$ associé à la VA a obtenu de meilleurs résultats que les modèles univariés basés sur les mêmes variables). Nous illustrons cela par le modèle 3D, qui contrairement aux autres modèles, possède deux variables indépendantes. Ce dernier présente de meilleurs résultats.

Néanmoins de belles perspectives existent dans la modélisation individualisée d'un parcours de course de montagne et des prédictions de performance basées sur le test « trail ». Dans une prochaine étude, il serait intéressant de proposer notre modélisation combinée avec d'autres méthodes à l'instar de celle du travail de Christelle Crettol afin d'obtenir davantage de précision.

Bibliographie

- Asok, K. G. (2004). Anaerobic Threshold: Its Concept and Role in Endurance Sport. *Malaysian. Journal of Medical Sciences*, 11(1), 24-36.
- Anderson, O. (2013). *Running science*. Champaign: Human Kinetics.
- Balducci, P., (2017). *La place du coût énergétique dans les facteurs de performance en trail running* (Thèse de doctorat, Université de Claude Bernard, Lyon, France).
https://www.researchgate.net/profile/Pascal_Balducci2/publication/321228725_LA_PLACE_DU_COUT_ENERGETIQUE_DANS_LES_FACTEURS_DE_PERFORMANCE_EN_TRAIL_RUNNING/links/5a15d6e60f7e9bc6481c7a9b/LA-PLACE-DU-COUT-ENERGETIQUE-DANS-LES-FACTEURS-DE-PERFORMANCE-EN-TRAIL-RUNNING.pdf.
- Balducci, P., Cléménçon, M., Morel, B., Quiniou, G., Saboul D. & Hautier, C. A. (2016). Comparison of level and graded treadmill tests to evaluate endurance mountain runners. *Journal of Sports Science and Medicine*, 15, 239-246.
- Bazin, S. & Delorme, J-M. (2015). *Trail Running*. Paris: Amphora.
- Beyer, E. (1992). *Dictionnaire des sciences du sport*. Schorndorf : Verlag Karl Hofmann.
- Billat, V. (2001). L'apport de la science dans l'entraînement sportif: l'exemple de la course de fond. *Staps*, 54(1), 23-43. doi:10.3917/sta.054.0023.
- Billat, V. (1998). *Physiologie et méthodologie de l'entraînement. De la théorie à la pratique*. Louvain-la-Neuve : De Boeck Université.
- Billat, V. (2013). *VO₂max à l'épreuve du temps*. Louvain-la-Neuve: De Boeck Supérieur.
- Billat, V., Berthoin, S., Blondel, N. & Gerbeaux, M. (2001). La vitesse à VO₂ max, signification et applications en course à pied. *Staps*, 54(1), 45-61. doi:10.3917/sta.054.0045.
- Billat, V., Hill, D. W., Pinoteau, J., Petit, B. & Koralsztejn, J-P. (1996). Effect of Protocol on Determination of Velocity at $\dot{V}O_2$ max and on its Time to Exhaustion. *Archives of Physiology and Biochemistry*, 3(104), 313-321. doi:10.1076/apab.104.3.313.12908.
- Bosch, A.N., Goslin, B.R., Noakes, T.D. et Dennis, S.C. (1990). Physiological differences between black and white runners during a treadmill marathon. *Eur J Appl Physiol*, 61, 68-72. doi:10.1007/BF00236696.
- Cazorla, G. (2014). Evaluation des capacités physiologiques et physiques [Cours de diplôme à l'Université de Marrakech, Maroc]. Accès à l'adresse <http://areaps.org/ppt/Potentiel%20a%C3%A9robic/Cazorla%20G.%20Evaluation%20des%20capacit%C3%A9s%20%C3%A9nerg%C3%A9tiques.%20Les%20capacit%C3>

[%A9s%20a%C3%A9robies.pdf](#).

- Cazorla, G. (2004). Tests de terrain pour évaluer l'aptitude aérobie et utilisation de leurs résultats dans l'entraînement [Etude de l'Université de Victor Segalen, Bordeaux, France]. Accès à l'adresse <http://areaps.org/wp-content/uploads/2017/12/CAZORL1.pdf>.
- Conley, D.L. & Krahenbuhl, G.S. (1980). Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 12, 357- 360. doi : 10.1249/00005768-198012050-00010.
- Daniels, J., Scardina, N., Hayes, J. & Foley, P. (1984). Elite and subelite female middle- and long-distance runners. In D.M. Landers (Ed). *Sport and elite performers*, 3, 57-72.
- Davies, C.T., Sargeant, A.J. & Smith, B. (1974). The physiological responses to running downhill. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 32(3), 187-194.
- di Prampero, P.E., Atchou, G., Bruckner, J.C. & Moia, C. (1986). The energetics of endurance running. *Eur. J. Appl. Physiol*, 55, 259-266.
- Firstbeat: Automated Fitness Level (VO₂max) Estimation with Heart Rate and Speed Data (2014). Accès à l'adresse https://assets.firstbeat.com/firstbeat/uploads/2017/06/white_paper_VO2max_30.6.2017.pdf.
- Gindre, C. (2013). *Courir en harmonie*. Chavéria : Volodalen.
- Giovanelli, N., Ortiz, A.L., Henninger, K. & Kram, R. (2016). Energetics of vertical kilometer foot races; is steeper cheaper?. *J Appl Physiol*, 120, 370–375. doi:10.1152/jappphysiol.00546.2015.
- Guinoubi, C., (2005). *Prédiction du %FCmax lors d'efforts à intensité constante* (Mémoire pour l'obtention du grade de Maîtrise (M. Sc), Université de Montréal, Canada). https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/bitstream/handle/1866/15450/Guinoubi_Chamseddine_2005_memoire.pdf?sequence=1.
- Karp, J.R. (2007). Training Characteristics of Qualifiers for the U.S. Olympic Marathon Trials. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2, 72-92. doi:10.1123/ijsp.2.1.72.
- Kasch, F., Wallace, J., Huhn, R., Krogh, L. & Hurl, P. (1976). VO₂max during horizontal and inclined treadmill running. *Journal of Applied Physiology*, 40, 982-983.
- Lacour, J.R., Padilla-Magunacelaya, A. Barthélémy, J.C. & Dormois, D. (1990) The energetics of middle distance running. *European Journal of Applied Physiology*, 60, 38-43. doi : <https://doi.org/10.1007/BF00572183>.
- Lacroix, E. (2018a). *Trail! Découvrir, observer et modéliser*. Paris: Amphora.

- Lacroix, E. (2018b). *Trail ! Tome 2 - planifier et s'entraîner*. Paris: Amphora.
- Larry Kenney, W., Wilmore, J.H. & Costill, D.L. (2017). *Physiologie du sport et de l'exercice*. Louvain-la-Neuve: De Boeck Supérieur.
- Léger, L.A., & Mercier, D. (1983) Coût énergétique de la course sur tapis roulant et sur piste. *Motricité Humaine*, 2, 66-69.
- Mariani, D. (2014). Un sport qui marche. Les Suisses sont fous de course à pied. *Swissinfo.ch*. Accès à l'adresse https://www.swissinfo.ch/fre/un-sport-qui-marche_les-suisses-sont-fous-de-course-%C3%A0-pied/38773178.
- Minetti, A.E., Moia, C., Roi, G.S., Susta, D. & Ferretti, G. (2002). Energy cost of walking and running at extreme uphill and downhill slopes. *J Appl Physiol*, 93, 1039-1046. doi:10.1152/japplphysiol.01177.2001.
- Minetti, A.E., Ardigo, L.P. & Saibene, F. (1994). Mechanical determinants of the minimum energy cost of gradient running in humans. *Journal of Experimental Biology*, 195, 21-225.
- Morin, S., Ahmaïdi, S. & Leprêtre, P-M. (2014). Modélisation des effets de l'entraînement: revue des différentes études. *Science et Sport*, 29, 237-247. doi:10.1016/j.scispo.2013.11.003.
- Paavolainen, L., Nummela, A. & Rusko, H. (2000). Muscle power factors and VO₂max as determinant of horizontal and uphill running performance. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 10(5), 286-291.
- Paturel, M-H. & Montico, L. (2018). *Trail. Débuter, s'entraîner et progresser*. Grenoble: Glénat.
- Praz, C., Jagdeep, S., Praz, M. & Dériaz, O. (2011). Coût énergétique de la course en montée et en descente chez les coureurs entraînés pour la course de montagne. *Schweiz Z Für "Sportmedizin Sporttraumatologie"*, 59(1), 40-44.
- Saugy, J., Place, N., Millet, G.Y., Degache, F., Schena, F., & Millet, G. (2013). Alterations of Neuromuscular Function after the World's Most Challenging Mountain Ultra-Marathon. *Plos One*, 8(6). doi:10.1371/journal.pone.0065596.
- Schnitzler, C. (2008). La notion d'allure-cible pour construire des contenus en cycle terminal. *Revue EPS*, 333, 57-61.
- Sordello, J. (2015). *La bible du running*. Paris: Amphora.
- Suter, T. (2014). Stratégie Compétitions Swiss Athletics [Directives et règlements]. Accès à l'adresse https://www.swiss-athletics.ch/wp-content/uploads/Strat%C3%A9gie-Comp%C3%A9titions-2017_fr.pdf.

- Trilles, F. (2002). *Les techniques et méthodes de l'entraînement sportif*. Paris : CNFPT.
- Weineck, J. (1996). *Manuel d'entraînement*. Paris : Vigot.
- Wilson, B., Monego, A., Howard, M. & Thompson, M. (1979). Specificity of maximal aerobic power measurement in trained runners. *Science in Athletics*, 213-217.

Annexe

Résultats du test et de la course

| | Test « Trail » | | | | | | | | Course « Saillon-Ovronaz » | | | |
|--------------------|-------------------|----------------------|---------------|--------------------|---------------|---------------|-----------------------|---------------|----------------------------|---------------|------------|------|
| ID | Vitesse de course | Dénivellation totale | Dénivellation | Temps à épuisement | Palier final | Lactate final | Quotient respiratoire | Etat de forme | Temps total | Dénivellation | Classement | Borg |
| | [km/h] | [m] | [m/H] | [min] | [pente + min] | [mmol/L] | | | [sec] | [m/H] | | |
| S1 | 10 | 285.00 | 855.0 | 20'00 | 18% + 2'00 | 16.2 | 1.47 | 5/5 | 3073 | 998.11 | 1 | 8 |
| S2 ¹ | 10 | 262.50 | | 19'15 | 18% + 1'15 | 17.9 | | 4/5 | | | | |
| S3 ¹ | 10 | 255.00 | | 19'00 | 18% + 1'00 | 17.0 | | 4/5 | | | | |
| S4 | 10 | 255.00 | 805.3 | 19'00 | 18% + 1'00 | 17.9 | 1.58 | 4/5 | 3122 | 982.45 | 2 | 10 |
| S5 | 10 | 225.00 | 750.0 | 18'00 | 15% + 3'00 | 16.9 | 1.37 | 4/5 | 3367 | 910.96 | 3 | 8 |
| S6 ¹ | 10 | 225.00 | | 18'00 | 15% + 3'00 | 18.6 | | 3/5 | | | | |
| S7 ¹ | 10 | 200.00 | | 17'00 | 15% + 2'00 | 20.8 | | 4/5 | | | | |
| S8 | 10 | 187.50 | 681.8 | 16'30 | 15% + 1'30 | 22.8 | 1.15 | 4/5 | 3707 | 827.41 | 7 | 7 |
| S9 | 10 | 175.00 | 656.3 | 16'00 | 15% + 1'00 | 12.9 | 1.17 | 4/5 | 3559 | 861.82 | 5 | 8 |
| S10 | 10 | 175.00 | 656.3 | 16'00 | 15% + 1'00 | 15.7 | 1.45 | 4/5 | 3874 | 791.74 | 8 | 7 |
| S11 | 10 | 175.00 | 656.3 | 16'00 | 15% + 1'00 | 12.1 | 1.44 | 4/5 | 3524 | 870.37 | 4 | 8 |
| S12 | 10 | 162.50 | 627.1 | 15'30 | 15% + 0'30 | 12.9 | 1.21 | 4/5 | 3568 | 859.64 | 6 | 8 |
| S13 ¹ | 10 | 162.50 | | 15'30 | 15% + 0'30 | 10.6 | | 3/5 | | | | |
| S14 ¹ | 10 | 162.50 | | 15'30 | 15% + 0'30 | 15.7 | | 4/5 | | | | |
| S15 ¹ | 10 | 150.00 | | 15'00 | 12% + 3'00 | 16.8 | | 3/5 | | | | |
| S16 ¹ | 10 | 140.00 | | 14'30 | 12% + 2'30 | 13.0 | | 4/5 | | | | |
| S17 | 10 | 90.00 | 450.0 | 12'00 | 09% + 3'00 | 14.4 | 1.18 | 4/5 | 4262 | 719.66 | 9 | 8 |
| S18 ^{1,2} | 10 | 33.00 | | 06'40 | 06% + 0'40 | 7.0 | | 5/5 | | | | |
| S19 | 7 | 157.50 | 525.0 | 18'00 | 15% + 3'00 | 16.2 | 1.17 | 4/5 | 4569 | 671.31 | 10 | 8 |
| S20 | 7 | 157.50 | 525.0 | 18'00 | 15% + 3'00 | 12.7 | 1.25 | 4/5 | 4641 | 660.89 | 11 | 8 |
| S21 | 7 | 122.50 | 459.4 | 16'00 | 15% + 1'00 | 13.8 | 1.20 | 4/5 | 5653 | 542.58 | 12 | 7 |
| Moyenne | | | 637.27 | | | 15.8 | 1.30 | 3.9 | 3909.9 | 808.08 | | 7.92 |
| Ecart-type | | | 129.13 | | | 3.5 | 0.15 | 0.5 | 749.5 | 136.8 | | 0.79 |

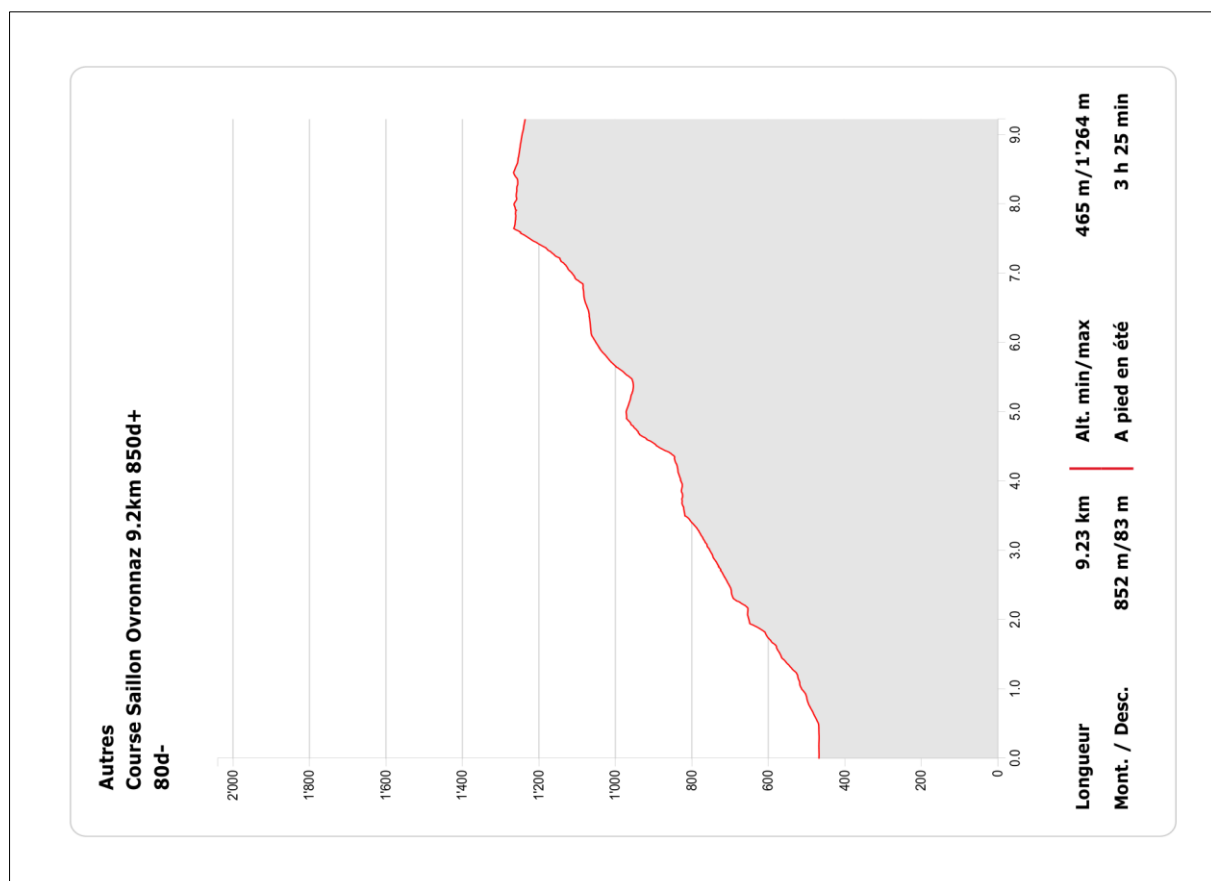
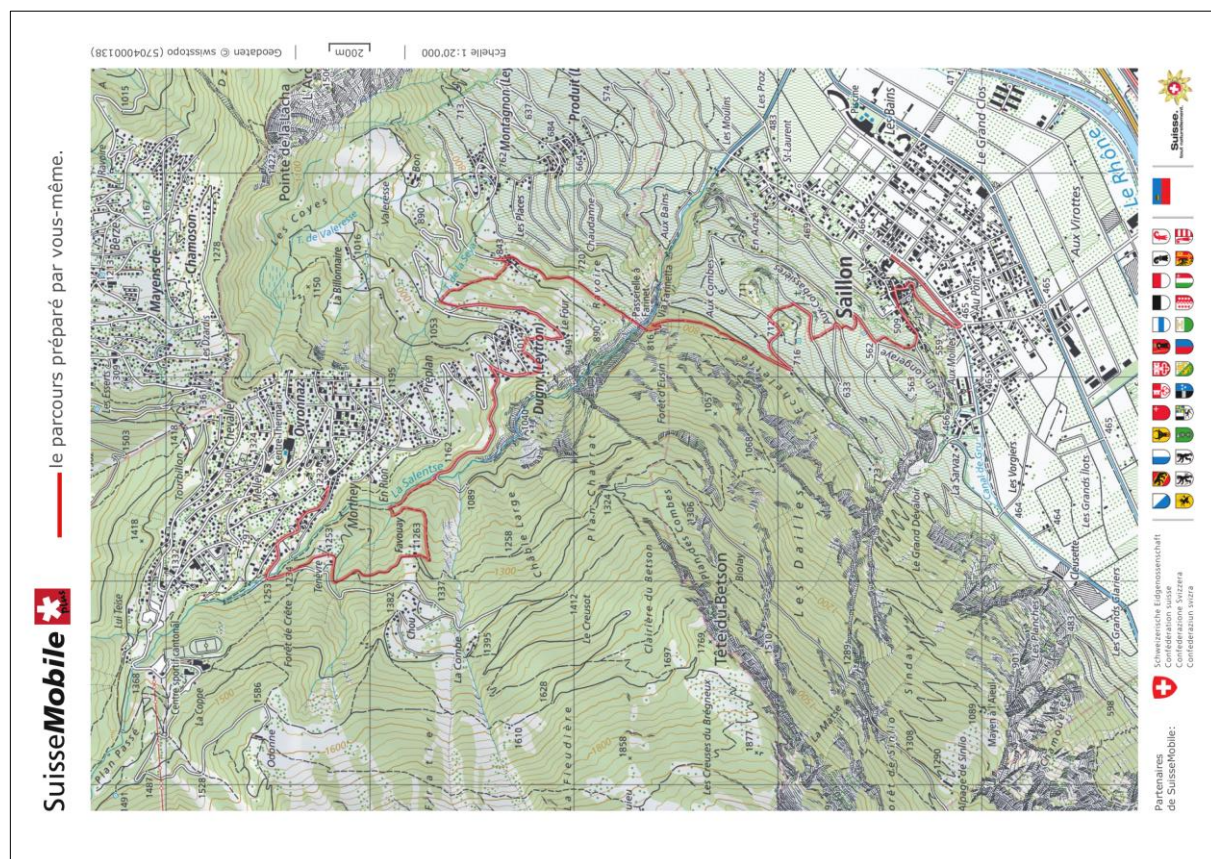
¹Sujet n'ayant pas réalisé la course « Saillon – Ovronnaz »

²Test non valide puisque sa concentration de lactate sanguin n'est pas supérieure à 9 mmol/L.

Tableau des prédictions selon Gindre

| VMA | 10 km (sec) | 15 km (sec) | 20 km (sec) | VMA | 10 km (sec) | 15 km (sec) | 20 km (sec) |
|-------|----------------|----------------|----------------|-------|----------------|----------------|----------------|
| 13.50 | 3060 | 4800 | 6540 | 17.50 | 2365 | 3688 | 5010 |
| 14.00 | 2940 | 4620 | 6300 | 18.00 | 2300 | 3580 | 4860 |
| 14.50 | 2850 | 4470 | 6090 | 18.50 | 2235 | 3480 | 4725 |
| 15.00 | 2760 | 4320 | 5880 | 19.00 | 2170 | 3380 | 4590 |
| 15.50 | 2670 | 4185 | 5700 | 19.50 | 2105 | 3280 | 4455 |
| 16.00 | 2580 | 4050 | 5520 | 20.00 | 2040 | 3180 | 4320 |
| 16.50 | 2505 | 3923 | 5340 | 20.50 | 1985 | 3093 | 4200 |
| 17.00 | 2430 | 3795 | 5160 | 21.00 | 1930 | 3005 | 4080 |

Tracé et profil de la course Saillon-Ovronnaz



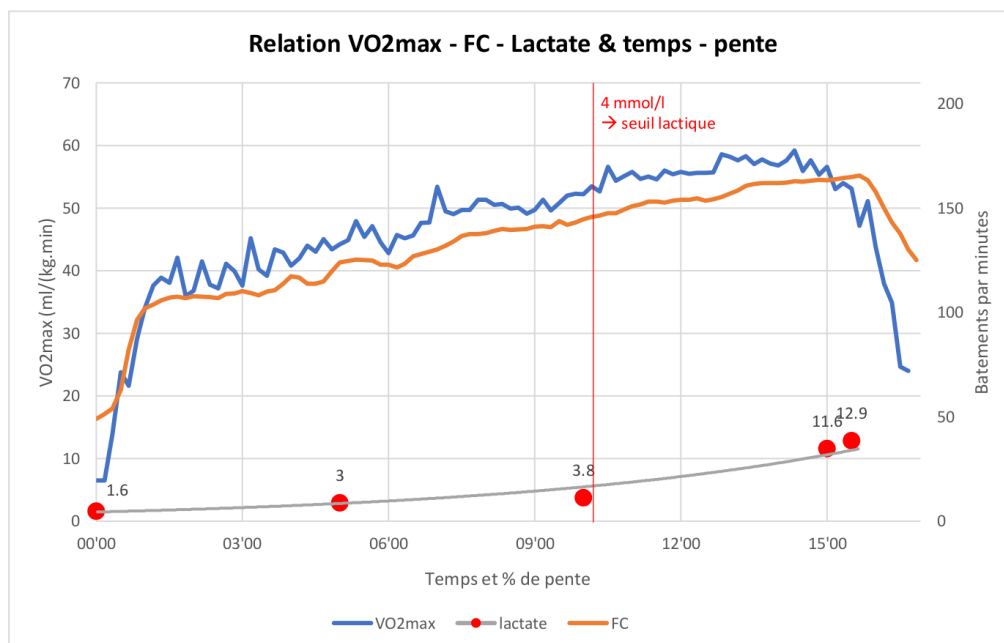
Résultats du test « trail »



Résultats du test

Université de Fribourg
Département des sciences et de médecine
Science du mouvement et du sport

| | | | |
|--|---------------------|-------------------------------|--|
| Protocole | Test Trail - VO2max | Date | 03.05.2019 |
| Vitesse | 10 km/h | Description | Test avec vitesse constante et incrément de pente de 3% toutes les 3 minutes |
| Athlète | Bachmann Gerald | VO2max (ml/kg/min) | 57.5 |
| Poids | 76.4 kg | FC max (bpm) | 166 |
| Taille | 182 cm | VMA Théorique | 16.5 |
| | | Lactate en fin d'ex. | 12.9 (mmol/l) |
| Pâlier-pente atteint à l'interruption | 15% (+30") | Seuil lact. (4 mmol/l) | 146 bpm & à 93% de la VO2max |
| Temps écoulé à l'interruption | 15min30" | | |



| Tableau des zones d'entrainement personnalisées | | | | | |
|---|--|----------|----------|-----|--|
| Zones | Type d'effort | % FC max | %VO2 max | FC | |
| Allure 5 | Développement VO2max & développement VMA | 100 | >100 | 166 | Travail fractionné très court |
| | | 95 | 100 | 158 | T. fractionné court |
| Allure 4 | Développement VO2max & seuil anaérob. (+aérob) | 95 | 95 | 158 | T. fractionné court |
| | | 90 | 85 | 149 | T. fractionné moyen |
| Allure 3 | Allure marathon & développement seuil | 90 | 85 | 149 | T. fractionné au seuil aérobie (allure marathon) |
| | | 75 | 70 | 125 | et anaérobie (allure semi) & travail continu |
| Allure 2 | Travail continu | 75 | 70 | 125 | Travail continu |
| | Endurance | 70 | 65 | 116 | Développement de l'endurance |
| Allure 1 | Echauffement | 70 | 65 | 116 | Vitesse d'échauffement |
| | Récupération | 65 | 60 | 108 | Vitesse de récupération |

Formulaire de consentement

| UNI FR UNIVERSITÉ DE Fribourg UNIVERSITÄT Fribourg | | SCENES DU SPORT TRAVAIL DE MASTER CHETIAZ JÉRÔME | | SP 2019 | |
|---|--|--|--|---------|--|
| <p>Je sais que mes données personnelles seront traitées anonymement et à des fins de recherche.</p> <ul style="list-style-type: none">Je prends part de façon volontaire à cette étude. Je peux, à tout moment et sans avoir à fournir de justification, révoquer mon consentement à participer à cette étude.Je suis conscient du fait que les exigences et les restrictions mentionnées dans l'information aux participants devront être respectées pendant la durée de l'étude. L'investigateur peut m'exclure à tout moment de l'étude dans l'intérêt de ma santé.Je conserve l'information écrite aux participants et peux recevoir, en cas d'intérêt, une copie de ma déclaration écrite de consentement. | | | | | |
| Fribourg, le | | Signature du participant | | | |
| <p>Attestation de l'investigateur</p> <p>J'atteste par ma signature avoir expliqué au participant la nature, l'importance et la portée de l'étude. Je déclare satisfaire à toutes les obligations en relation avec cette étude. Si je devais prendre connaissance, à quelque moment que ce soit durant la réalisation de l'étude, d'informations susceptibles d'influer sur le consentement du participant à participer à l'étude, je m'engage à l'en informer immédiatement.</p> | | | | | |
| Fribourg, le | | Signature de l'investigateur | | | |

2 / 3

| UNI FR UNIVERSITÉ DE Fribourg UNIVERSITÄT Fribourg | | SCENES DU SPORT TRAVAIL DE MASTER CHETIAZ JÉRÔME | | SP 2019 | |
|---|--|---|--|---------|--|
| <p>Formulaire de consentement</p> | | | | | |
| <p>Participant(e)</p> | | | | | |
| Nom | | Prénom | | | |
| <ul style="list-style-type: none">Veuillez lire attentivement ce formulaire.N'hésitez pas à poser des questions si vous souhaitez obtenir davantage de précisions. | | | | | |
| <p>Informations générales</p> | | | | | |
| Titre de l'étude | | La prédiction de performance en course de montagne à travers le test « trail » de la Clinique Romande de Réadaptation – SUVA. | | | |
| Promoteurs | | Sciences du Mouvement et du Sport, Université de Fribourg, Boulevard de Pérolles 90, 1700 Fribourg | | | |
| Lieu de l'étude | | Laboratoire des sciences du mouvement et du sport, Université de Fribourg, bâtiment Pérolles 21, 1700 Fribourg | | | |
| Dédommagement | | Aucun dédommagement n'est prévu pour le test en laboratoire (si ce n'est l'obtention de leurs résultats et données personnelles.) | | | |
| Investigateurs | | Alain Rouvenaz, Thibaut Le Naour, Jérôme Crettaz | | | |
| <p>Consentement</p> <ul style="list-style-type: none">Je certifie répondre à tous les critères de santé du formulaire reçu par e-mail le 2 avril 2019 (et qui se trouve également en fin de document.)Je certifie avoir lu et compris l'information écrite aux participants (version envoyée par mail du 2 avril 2019) qui m'a également été remise le jour de test quant aux objectifs, déroulement et risques éventuels de l'étude.Je certifie avoir reçu des réponses satisfaisantes aux éventuelles questions que j'ai posées en relation avec ma participation à l'étude. | | | | | |

1 / 3

Critères de santé

Dans l'intérêt de votre santé, merci de répondre à ces quelques questions afin d'assurer le bon déroulement et la meilleure sécurité possible pour notre étude.

Je m'engage à répondre sincèrement au formulaire et certifie l'authenticité de mes réponses.

| Réponse | | Questions |
|--------------------------|--------------------------|--|
| oui | non | |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 1) Avez-vous vécu N'IMPORTE LAQUELLE des situations suivantes (A à F) au cours des six derniers mois : |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | a) Diagnostic ou traitement relativement à une maladie du cœur ou à un AVC, ou douleur/malaise/pression au niveau de la poitrine en pratiquant vos activités de la vie quotidienne ou une activité physique ? |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | b) Diagnostic ou traitement relativement à une hypertension artérielle ou à une tension artérielle au repos de 160/90 mm de Hg ou plus ? |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | c) Vertiges ou étourdissements durant l'activité physique ? |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | d) Essoufflement au repos ? |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | e) Perte de conscience/évanouissement pour quelque raison que ce soit ? |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | f) Commotion ? |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 2) Présentez-vous actuellement de la douleur ou une enflure à n'importe quelle partie de votre corps (p. ex. blessure, poussée aiguë d'arthrite ou douleur au dos) qui nuit à votre capacité de mener une vie active ? |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 3) Un professionnel de la santé vous a-t-il recommandé d'éviter ou de modifier certains types d'activité physique ? |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 4) Avez-vous tout autre problème médical ou physique (p. ex. diabète, cancer, ostéoporose, asthme, lésion médullaire) qui pourrait nuire à votre capacité de mener une vie active ? |

Si j'ai répondu **non** à toutes les questions, je suis prêt à réaliser le test d'effort.

Si j'ai répondu **oui** à une des questions, je ne pourrais malheureusement pas prendre part aux tests pour des raisons de sécurité.

Remerciements

Pour conclure cette étude, je souhaite remercier toutes les personnes qui m'ont aidé à la réalisation de ce travail de master. En premier lieu, je commencerai par mes conseillers Alain Rouvenaz et Thibaut Le Naour qui ont su m'aguiller et m'aider avec leurs conseils et connaissances ; ma collègue Christelle Crettol qui, en plus d'avoir contribué à la recherche des sujets, m'a apporté une aide précieuse lors de la réalisation des tests et Xavier Chenevière qui m'a offert ses précieux conseils pour l'utilisation de l'appareillage de mesure.

En second lieu, toutes les personnes externes au milieu universitaire, à commencer par les collaborateurs de la Clinique Romande de Réadaptation – SUVA : Michaël Duc et Arnaud Rapillad, puis Nicolas Montavon des Hopitaux Fribourgeois.

Pour terminer, un tout grand merci à tous les sujets qui ont contribué à la réussite de cette étude et à Maëlle Vianin pour la relecture du travail.