

UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE

ECOLE DOCTORALE 463 Sciences Du Mouvement Humain
Institut des Sciences du Mouvement Etienne-Jules Marey

Thèse présentée pour obtenir le grade universitaire de docteur

Discipline : Science et Technique des Activités Physiques et Sportives

Spécialité : Sciences du Mouvement Humain

Simon DEVYS

Analyse et optimisation pluridisciplinaire de la performance
en vélo tout terrain cross-country olympique (VTT XCO)

Multidisciplinary analysis and optimization of the performance in
mountain bike Olympic cross-country (MTB XCO)

Soutenue le 05/06/2019 devant le jury :

Pr. William BERTUCCI	Université de Reims	Rapporteur
Dr. Vincent MARTIN	Université Clermont Auvergne	Rapporteur
Pr. Nicolas PEYROT	Le Mans Université	Examineur
Dr. Frédérique HINTZY	Université Savoie Mont Blanc	Examineur
Pr. Denis BERTIN	Aix-Marseille Université	Directeur de Thèse
Dr. Guillaume RAO	Aix-Marseille Université	Co-Directeur de Thèse

*« Je n'ai guère qualité pour préfacier ce livre ; car voilà trois jours, pas davantage,
que j'ai avalé ma première course sur le Pégase à pédales.*

Il est vrai que l'étrange animal m'a conquis du coup et que je ne dévéloçipède plus.

*Voler, le corps en souple équilibre, les muscles en action frénétique et rythmée,
la sueur bue par le vent, les poumons gorgés d'oxygène, c'est une volupté tout bêtement. »*

Préface de Jean Richepin à l'*Histoire générale de la vélocipédie*,
par Baudry de Saunier, 1891

Résumé

Ce travail de thèse s'articule autour de l'analyse des caractéristiques de la performance dans la discipline du Vélo Tout-Terrain Cross-Country Olympique (VTT XCO). La performance produite dans une situation d'interaction homme-matériel en condition ouverte tel que cela peut être le cas sur un parcours de VTT XCO résulte de l'adéquation optimale entre le pratiquant, vu sous ses aspects pluridisciplinaires, et son matériel. La discipline spécifique du XCO a fortement évolué au niveau réglementaire et technologique depuis une décennie. C'est pourquoi l'objectif de mes recherches a été de caractériser à la fois la performance in-situ et en laboratoire de manière à améliorer notre compréhension de la discipline dans son état actuel, afin de proposer des interventions au niveau de l'entraînement et sur des aspects plus fondamentaux du pédalage en VTT.

Nos premières observations nous ont permis de mettre en évidence que la discipline était constituée de nombreuses phases de hautes intensités malgré le fait que les phases de non-pédalage représentent un quart du temps de course. Nous avons par la suite montré que le format actuel correspond à une épreuve de haute intensité à la fois acyclique et intermittente, une dynamique plutôt atypique se rapprochant de certains sports collectifs. Pour finir, l'analyse de l'efficacité du pédalage des coureurs de cette discipline nous a amené à constater qu'une modification du type de matériel utilisé n'entraîne pas forcément de changement dans le pattern d'application des forces des coureurs. L'ensemble des résultats nous a poussé à nous interroger sur la pertinence des tests actuels proposés aux coureurs. Nous avons donc conclu notre travail en proposant une méthode originale d'évaluation mixte (laboratoire-terrain) permettant d'étudier les facteurs de performance pertinents en VTT XCO.

Mots clés : vélo tout-terrain, cross-country Olympique, facteurs de performance, analyse pluridisciplinaire, physiologie, biomécanique, pédalage

Abstract

This thesis focuses on the analysis of performance characteristics in the Cross-Country Olympic Mountain Bike (MTB XCO) discipline. The performance produced in a man-material interaction situation results from the optimal adequacy between the rider, having regard to its multidisciplinary aspects, and his equipment. The XCO's specific discipline has evolved considerably, both in terms of regulations and technology, in just under a decade. Therefore, the objective of my research has been to characterize both in-situ and laboratory performance in order to improve our understanding of the discipline in its current state, in order to propose interventions at the level of training and on more fundamental aspects of pedalling in mountain bikes.

Our first observations allowed us to highlight the fact that the discipline is composed of many high intensity phases, despite the fact that the non-pedaling phases represent a quarter of the running time. We have subsequently shown that the current format corresponds to a high intensity event that is both acyclic and intermittent, a rather atypical dynamic close to some team sports. Finally, the analysis of the effectiveness of the cyclists' pedalling in this discipline led us to conclude that a change in the type of equipment used does not necessarily lead to a change in the pattern of application of the cyclists' forces. All the results have made us wonder the relevance of the current tests offered to the athletes. We therefore concluded our work by proposing an original mixed evaluation method (laboratory-field) to study the relevant performance factors in MTB XCO.

Keywords: mountain biking, Olympic cross-country, performance factors, multidisciplinary analysis, physiology, biomechanics, pedalling

Remerciements

Je veux adresser mes premiers remerciements à mon directeur de thèse Denis Bertin et à mon co-directeur Guillaume Rao. J'ai pu mener ce projet à son terme grâce à leur aide et à la confiance qu'ils m'ont témoignée. Ils m'ont accueilli avec convivialité dès le premier jour et sont toujours restés accessibles. Ils ont su me conseiller, m'aider à cadrer mon travail durant ces années où j'ai beaucoup appris. Merci à Denis pour sa rigueur et sa sérénité. Sa concentration et ses connaissances ont été de très motivants modèles. Merci à Guillaume pour l'énergie et le temps qu'il a consacré à organiser, discuter, corriger et améliorer ce travail. Je n'oublie pas que je lui dois beaucoup.

J'exprime toute ma reconnaissance envers les membres du jury, le Docteur Vincent Martin, le Professeur William Bertucci, le Docteur Frédérique Hintzy et le Professeur Nicolas Peyrot, pour avoir accepté de lire, évaluer et contribuer à l'amélioration de ce travail.

J'ai travaillé durant cinq années au sein de l'Institut des Sciences du Mouvement (ISM) Etienne-Jules Marey, dans l'équipe Performance Motrice et Modélisation Multi-échelles (P3M). Ces deux structures m'ont permis d'évoluer dans un cadre libre et motivant, en compagnie de chercheurs passionnés et passionnants. Je veux remercier le directeur de l'Institut et responsable d'équipe, le Professeur Eric Berton, pour ces conditions agréables.

Je tiens tout particulièrement à remercier Arnaud Hays, pour les connaissances et les valeurs qu'il a su me transmettre, pour son soutien aussi dans les moments plus difficiles, ses précieux conseils et son optimisme. Je veux également remercier mon parrain de thèse, Gilles Montagne, pour son écoute. J'adresse mes remerciements à André Jacques, pour ses talents d'ingénierie qui m'ont grandement profité lors de la mise en place de mes expérimentations, mais aussi à Sandrine Galmiche, pour sa bienveillance et toute l'aide qu'elle a pu m'apporter.

Je souhaite remercier tous les athlètes et entraîneurs que j'ai eu la chance de rencontrer et qui ont participé à mes expérimentations. En premier lieu, Yvon Vauchez et l'ensemble des coureurs de l'équipe de France, qui ont été présents à la genèse de ce projet. Puis, bien évidemment, je veux remercier les jeunes athlètes talentueux du TechnoTeam13, sur lesquels j'ai toujours pu compter pour travailler et apprendre sereinement.

J'adresse ma plus profonde sympathie aux étudiants que j'ai eu la chance d'avoir en TD et en TP durant mon année de monitorat ainsi qu'envers les stagiaires que j'ai eu le plaisir de rencontrer et d'encadrer au laboratoire.

Pour leur bonne humeur, leur humour et leurs encouragements qui me sont chers, un grand merci à tous mes collègues et ami(e)s que j'ai côtoyés. Parmi eux, il y a eu les anciens : Marvin et Manu, les plus récents : Romain et Laurie-Anne, et les petits nouveaux : Justin, Dorian et Laura. Ils font partie de ces rares personnes aux côtés desquelles le travail devient un plaisir.

J'ai aussi une pensée affectueuse pour Fred Pous et Carole Fanchon avec lesquels chaque discussion est un plaisir. Je veux également remercier Nathalie Roustan et Nathalie Fenouil pour l'aide et les conseils précieux qu'elles m'ont apportés tout au long de ces années.

Comme j'ai peur d'oublier d'en nommer, je remercie tous ceux que la route m'a amené à croiser, toutes ces petites (ou grandes) rencontres qui ont partagé, peut-être même sans le savoir, une partie de cette aventure. Par leur présence, leur convivialité, leur sourire ou leur bienveillance, ils m'ont transmis une petite partie de cette énergie nécessaire à l'aboutissement de ce travail.

Un grand merci à mes proches et amis, pour leur présence et leur fidélité tout au long de la thèse. Je pense particulièrement à Matthieu et à Lucie, les meilleurs amis que l'on puisse imaginer. Merci à Christine pour sa gentillesse et son soutien sans faille. Je pense aussi très fort à ma grande sœur Marie et à sa petite famille. Je les remercie tous pour leurs encouragements et chacune de leurs petites attentions qui m'ont permis d'avoir la sérénité essentielle à l'accomplissement de ce projet.

Enfin, je remercie du fond du cœur mes parents pour leur soutien inconditionnel tout au long de mon cursus universitaire qui m'a aidé à garder confiance et enthousiasme. C'est leur dévouement, leur bienveillance, leur patience et leur intelligence qui ont fait de moi l'adulte que je suis devenu.

Merci à Florence d'avoir été présente chaque jour auprès de moi avec tendresse, gentillesse et compréhension. Merci pour ce regard unique et merveilleux capable de chasser tous les doutes et d'enchanter chaque moment.

« Citius, Altius, Fortius »

Table des matières

Résumé	3
Abstract	4
Remerciements	5
Table des matières	8
Table des illustrations	10
Table des abréviations	14
1. Introduction générale	15
1.1. Des origines du cyclisme jusqu'au VTT XCO	16
1.1.1. L'histoire du vélo tout terrain	16
1.1.2. Le cross-country olympique (XCO)	20
1.2. La performance en cyclisme	24
1.2.1. La pluralité des déterminants de la performance	24
1.2.2. Les facteurs biomécaniques	26
1.2.3. Les facteurs physiologiques	38
1.2.4. Les facteurs technologiques	42
1.3. Synthèse	47
2. Caractérisation <i>in situ</i> de la pratique du VTT XCO moderne	49
2.1. La nécessité de mesures de terrain	50
2.2. Expérimentation avec le haut-niveau	59
2.2.1. Matériel et méthode	60
2.2.2. Traitement des données	64
2.2.3. Résultats	65
2.2.4. Discussion	70
2.3. Synthèse	74
3. Evaluation de la dynamique des efforts en XCO durant la course	75
3.1. Etat des lieux et analyse des connaissances actuelles	76
3.2. Etude des contraintes liées à la pratique moderne du XCO	79
3.2.1. Matériel et méthode	79
3.2.2. Traitement des données	83

3.2.3.	Résultats	84
3.2.4.	Discussion	89
3.3.	Synthèse	95
4.	Analyse de la spécificité de la technique de pédalage en XCO	100
4.1.	Les déterminants de la qualité de pédalage	101
4.2.	Etude de l'influence du type de cadre (Route/VTT) sur la technique en VTT	106
4.2.1.	Cadre de l'expérimentation	106
4.2.2.	Article scientifique : Changer le cadre de vélo influence-t-il le patron d'application des forces à la pédale des cyclistes de VTT XCO ?	107
4.3.	Synthèse	117
5.	Discussion générale	119
6.	Valorisation et recommandations	127
7.	Conclusion et perspectives	133
	Bibliographie	135
	Annexes	148
A.	Article scientifique : Comprendre les exigences physiologiques du format de course du vélo tout-terrain cross-country olympique (VTT XCO)	148

Table des illustrations

Figures

Figure 1. Photographie de coureurs lors de la coupe du monde de VTT cross-country UCI 2018 à Nové Město (République Tchèque) (@RedBull)	15
Figure 2. Evolution des modèles de Bicyclettes (@wikipedia.org)	16
Figure 3. Premiers pratiquants du VTT	18
Figure 4. Le premier modèle de VTT : Le Breezer	19
Figure 5. Photo du départ de la course de VTT dans la catégorie Elite Homme aux J.O. de Rio en 2016 (@Tim De Waele)	19
Figure 6. Le cycliste français Julien Absalon lors d'une descente technique d'un parcours de VTT XCO (@Pedro Cury)	21
Figure 7. Le cycliste suisse Nino Schurter lors du championnat du monde 2018 de XCO à Lenzerheide (Suisse) (@VeloVert.com)	23
Figure 8. La cycliste suisse Sina Frei lors du championnat du monde U23 2018 de XCO à Lenzerheide (Suisse) (@VeloVert.com)	23
Figure 9. Modèle de la performance (d'après Weineck, 1997)	25
Figure 10. Ensemble des forces opposées à l'avancement du cycliste (@Sci-Sport.com)	27
Figure 11. Cinématique du cycle de pédalage (Adapté de @MensHealth.co.uk)	28
Figure 12. Zone d'activité globale des muscles de la jambe par groupes fonctionnels (Adapté de @RobMuller)	30
Figure 13. Représentation graphique des muscles actifs dans chaque phase du cycle, selon leur intensité, les muscles pouvant être très actifs (épais noir), modérément actif (fin noir) ou non actif (fin gris). (Adapté de Childers, 2009)	31
Figure 14. Pattern de pédalage de 2 cyclistes élites (a et b) illustrant la force totale appliquée sur la pédale au cours du cycle à une puissance de 200 W (d'après Kautz, 1991)	32
Figure 15. Représentation des composantes de la force appliquée à la pédale (d'après Bini et al, 2013)	33
Figure 16. Evolution des composantes de la force appliquée à la pédale lors du cycle de pédalage (d'après Bini et al, 2013)	33
Figure 17. Tracé de la contribution de force selon l'angle de la manivelle pour des coureurs de niveaux différents, respectivement : débutants, confirmés, experts (a, b et c).	34
Figure 18. Représentation schématique de l'évolution du couple (<i>torque en anglais</i>) lors du cycle de pédalage (@RohloffCompany)	36
Figure 19. Représentation des relations force/vitesse et puissance/vitesse avec les données recueillies lors de 3 sprints de 6 secondes (d'après Dorel et al., 2003)	37

Figure 20. Représentation de la relation entre la consommation d'oxygène (VO ₂) et la fréquence de pédalage lors d'un exercice sous-maximal à 250W (<i>d'après Busko, 2007</i>)	37
Figure 21. Présentation de l'évolution de la puissance développée en fonction de la durée de l'effort et filières énergétiques correspondantes (Ae = Aérobie ; AnL = Anaérobie Lactique ; ANA = Anaérobie Alactique) (<i>@krhealth.wordpress.com</i>)	40
Figure 22. Un VTT à cadre semi-rigide (à gauche) et un VTT à cadre tout-suspendu avec une suspension arrière (à droite) (<i>@Specialized</i>)	43
Figure 23. Tableau récapitulatif des avantages des différentes tailles de roues en VTT et comparaison de l'accélération et de l'angle d'attaque de chacun d'entre-eux (<i>@VéloActif</i>)	45
Figure 24. Photographie d'un athlète de l'équipe de France de VTT en expérimentation sur le site de la Coupe de France de XCO 2015 à Luminy (Marseille) (<i>@CyrilBussat</i>)	49
Figure 25. Moyenne et écart type de a : la puissance développée (W), b : la consommation d'oxygène (ml.min ⁻¹ .kg ⁻¹), et c : la fréquence cardiaque (bpm) pour deux tracés de surface différentes : route (blanc) vs hors-piste (noir) (<i>d'après Macdermid, 2015</i>)	51
Figure 26. Comparaisons des caractéristiques issues d'un test d'effort entre des vététistes (MTB, n=15) et des routiers : grimpeurs (climbers, n=9), polyvalents (all-terrain, n = 15) et rouleurs (flat specialists, n=10). (* p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001) (<i>d'après Impellizzeri et Marcora, 2007</i>)	52
Figure 27. Répartition temporelle de A : la consommation d'oxygène, B : la fréquence cardiaque, C : la puissance développée, D : la cadence de pédalage (<i>d'après Macdermid et Stannard, 2012</i>)	55
Figure 28. Evolution des données de consommation d'oxygène, de fréquence cardiaque et de puissance développée d'un athlète (<i>d'après Macdermid et Stannard, 2012</i>)	56
Figure 29. Relation entre la force effective moyenne et la vitesse de rotation des pédales d'un athlète (<i>d'après Macdermid et Stannard, 2012</i>)	57
Figure 30. Photographie des athlètes Victor Koretsky (à gauche) et Hugo Drechou (à droite) lors de la Coupe de France de XCO 2015 à Luminy (Marseille) (<i>@BrunoDonnangricchia</i>)	59
Figure 31. Tracé et profil du circuit officiel de coupe de France 2015 de Luminy	60
Figure 32. Photographies présentant un athlète et sa machine avec l'équipement au complet quelques instants avant le début de l'expérimentation	62
Figure 33. Illustrations du type d'obstacles franchis durant l'expérimentation (<i>@CyrilBussat</i>)	63
Figure 34. Chronologie d'un essai et localisation des points de repères	64
Figure 35. Répartition de la cadence pour les 6 sujets	66
Figure 36. Représentation des oscillations latérales en phase de relance	66
Figure 37. Représentation de la VO ₂ kg au cours de la course normalisée selon la VO ₂ max pour chacun des 6 athlètes	67
Figure 38. Consommation d'oxygène moyenne par zones d'intensité	68
Figure 39. Répartition de la consommation d'oxygène selon les seuils métaboliques	68
Figure 40. Evolution de l'activité musculaire moyenne au cours du cycle de pédalage. Le départ du cycle se fait manivelle à l'horizontale et pied droit en avant	69
Figure 41. Représentation de l'activité musculaire moyenne lors des phases statiques	69

Figure 42. Répartition du temps passé dans chaque zone (Uphill = Montée ; Flat/Rolling = Plat/Roulant ; Downhill = Descente) selon la technicité et selon le classement des coureurs (Top, Middle and Bottom Performers) (d'après Abbis et al, 2013)	70
Figure 43. Répartition de la consommation d'oxygène durant une course selon le niveau d'intensité (d'après Impellizzeri et al, 2002)	72
Figure 44. Photographie d'un athlète du pôle France de VTT en pleine expérimentation sur le parcours labellisé FFC de la Chapelle des Buis 2016 (Besançon) ©YvanClolus	75
Figure 45 – Disposition des capteurs de pression sur l'assise	82
Figure 46 - (A) Pourcentage de temps moyen passé en P4 par intervalles de 5 secondes. (B) Nombre moyen d'épisodes en P4 par intervalles de 5 secondes. Quand une différence entre les tours était significative, le d de Cohen a été calculé ($\alpha \geq 0.8$)	86
Figure 47 - (A et B) Zone physiologiques (VO_2 et FC) en fonction de la position GPS. (C) Zones de puissance en fonction de la position GPS.	87
Figure 48 – Puissance moyenne enregistrée durant les 6 sprints de 6 secondes effectués avant et après la course.	88
Figure 49 – Répartition des postures de pilotage en pourcentage du temps total	88
Figure 50 - Pourcentage de temps passé au-dessus de PMA selon la durée des épisodes	92
Figure 51. Evolution des paramètres subjectifs relevés après chaque tour grâce à une échelle de 0 à 20. (A : Perte de Force ; B : Fatigue cumulée ; C : Douleur ressentie)	96
Figure 52. Illustration graphique simplifiée des modèles de vélo de Route (à Droite) et de VTT (à gauche)	100
Figure 53. Relation entre l'IE et la puissance : a) Pour l'ensemble du cycle ; b) lors de la phase de descente ; c) lors de la phase de remontée (d'après Zameziati et al, 2006)	102
Figure 54. Valeurs moyennes de la force effective calculées pour quatre secteurs angulaires en fonction de la position de la manivelle sur l'ensemble du cycle dans les trois configurations de corps. (d'après Dorel et al, 2009)	104
Figure 55. Illustration d'un pédalier instrumenté de la marque SRM avec en loupe une de ses jauges de contraintes (©SRM.de)	105
Figure 56. Illustration des 6 composantes qu'il est possible de déterminer à partir des pédales instrumentées (3 forces et 3 moments)	106
Figure 57. Photographie de pédales instrumentées de laboratoire (©I-Crankset, Sensix)	106
Figure 58. Photographie de coureurs lors de la coupe du monde de VTT cross-country UCI 2018 à Albstadt (Allemagne) (©BartekWolinski)	122

Tableaux

Tableau 1. Représentation des corrélations (r de Pearson) entre la performance et différentes variables de puissance mesurées en laboratoire (intervalle de confiance de 95% entre parenthèses et P pour la significativité) (d'après Gregory et al, 2007)	53
Tableau 2. Répartition de la moyenne du temps passé dans chaque zone topographique	65
Tableau 3 – Pourcentage du temps total passé dans chaque zone physiologique pour chaque tour. Les données sont présentées comme moyenne ± écart-type, avec les résultats de l'ANOVA (*: différence significative entre Tour 1 et Tour 2; †: différence significative entre Tour 1 et Tour 3; ‡: différence significative entre Tour 2 et Tour 3).....	84
Tableau 4 – Pourcentage du temps total passé dans chaque zone de puissance pour chaque tour. Les données sont présentées comme moyenne ± écart-type, avec les résultats de l'ANOVA (*: différence significative entre Tour 1 et Tour 2; †: différence significative entre Tour 1 et Tour 3; ‡: différence significative entre Tour 2 et Tour 3).....	85
Tableau 5. Evolution des IE selon la cadence dans deux conditions de puissance et selon plusieurs cadences (60 et 80% _{PMA} ; FCC = <i>Freely Chosen Cadency</i>) (d'après Rossato et al, 2008).	102
Tableau 6. Avantages et inconvénients du type d'approche utilisé	128

Equations

Équation 1.	$Vd = (F \cdot L \cdot \omega) / RT$	26
Équation 2.	$RTotale = RAérodynamique + RRoulement + P$	27
Équation 3.	$P = C * \omega$	35
Équation 4.	$C = FEff * L$;	35
Équation 5.	$\omega = 2\pi / 60 * f$	35
Équation 6.	$VO2 = VE * (FIO2 - FEO2)$	38
Équation 7.	$IIE(\theta) = \frac{F_{eff}(\theta)}{F_{tot}(\theta)} * 100$	101
Équation 8.	$IE = \frac{\int_0^{2\pi} F_{eff}(\theta)}{\int_0^{2\pi} F_{tot}(\theta)} * 100$	101

Table des abréviations

Acronymes

ATP : Adénosine Triphosphate

BMX : *Bicycle Motocross*

DH : *Down Hill*

EMG : Electromyographie

FC : Fréquence Cardiaque

FFC : Fédération Française de Cyclisme

IE : Indice d'Efficacité du pédalage global ou *Index of pedalling Efficiency*

IIE : Indice d'Efficacité Instantané ou *Instantaneous Index of Efficiency*

MTB : *Mountain Bike*

PMA : Puissance Maximale Aérobie

RPM : Rotations Par Minute

SV : Seuil Ventilatoire

UCI : Union Cycliste Internationale

UVF : Union Vélocipédique de France

VCO₂ : Volume de Dioxyde de Carbone

VO₂ : Volume d'Oxygène

VO_{2max} : Débit maximal d'oxygène

VOPT : Vitesse Optimale

VTT : Vélo Tout-Terrain

XCO : Cross-Country Olympique

1. Introduction générale

Lorsque l'on souhaite réussir dans le milieu sportif, il est nécessaire de bien connaître les différents aspects de son sport pour atteindre le succès. En effet, la performance est liée à de multiples facteurs appartenant à des domaines diversifiés. Une démarche d'analyse et d'optimisation doit donc s'organiser autour d'une réflexion pluridisciplinaire, afin d'englober les différentes facettes de la performance. Cela est d'autant plus le cas lorsque l'activité met en jeu une interaction homme-matériel, comme par exemple dans le cyclisme. C'est avec cette vision en tête que nous avons choisi pour objet d'étude la discipline du vélo tout-terrain cross-country Olympique (VTT XCO). Le choix de ce sujet résulte avant tout d'une volonté de se mettre au service de la performance, en tentant de répondre à une problématique de terrain.

Le but de ce travail de thèse sera de mieux comprendre la pratique et de mettre en valeur les caractéristiques de son format moderne. Dans un premier temps, nous nous attacherons à décrire l'évolution du sport cycliste jusqu'au VTT XCO afin de comprendre les origines de cette discipline. Nous présenterons également ses particularités et son cadre réglementaire actuel, ce qui mettra en évidence l'intérêt que nous portons à cette pratique. Nous poursuivrons ce premier chapitre par la présentation des déterminants de la performance en cyclisme dans le but de souligner les avantages et la nécessité d'une approche pluridisciplinaire.



Figure 1. Photographie de coureurs lors de la coupe du monde de VTT cross-country UCI 2018 à Nové Město (République Tchèque) (©RedBull)

1.1. Des origines du cyclisme jusqu'au VTT XCO

1.1.1. L'histoire du vélo tout terrain

La naissance des courses cyclistes

Les premières traces d'activité vélocipédique remontent à 1817 et à l'invention de la *Laufmaschine* (« machine à courir » en allemand) par le baron badois Karl Drais connue également comme étant la Draisienne. C'est une machine constituée de deux roues alignées et d'une direction mobile surmontée d'une assise et mue par la poussée alternative des pieds aux sol. L'année suivante, l'invention fût brevetée en France sous le nom de Vélocipède (*véloce* = rapide et *pède* = pieds) et en Angleterre avec l'appellation *Hobby Horse* (« cheval de loisir »).

Cependant l'histoire du cyclisme commence véritablement avec l'évolution de ce concept et l'ajout de manivelles sur l'axe de la roue avant, transformant définitivement la nature de cette locomotion. On doit à Pierre et Ernest Michaux la création du vélocipède à pédales (ou Michaudine) en 1861 à Paris. Par la suite, de nombreux ingénieurs, inventeurs et artisans vont reprendre cette idée et progressivement améliorer les performances de cet engin. C'est ainsi que le 31 Mai 1868 a lieu la première course officielle en France, dans le Parc de Saint Cloud, et elle couronnera James Moore, un vétérinaire anglais, comme premier champion cycliste. De nombreuses avancées technologiques, telles que l'invention du pneumatique par John Boyd Dunlop en 1888, l'apparition de la transmission par chaîne ou encore l'évolution des formes de cadre, permirent d'augmenter les performances et le confort et favorisèrent l'engouement pour la bicyclette.

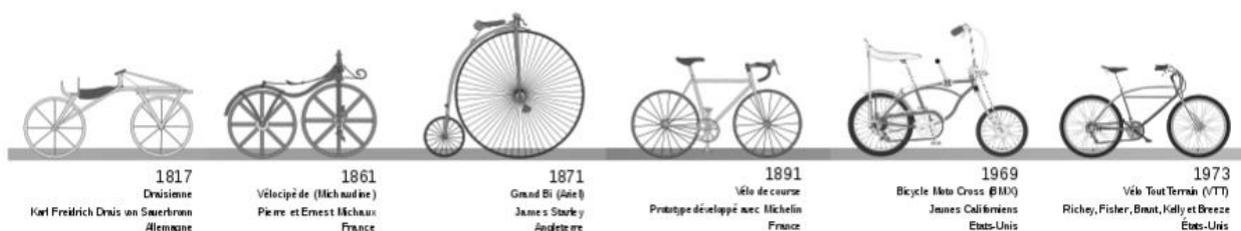


Figure 2. Evolution des modèles de Bicyclettes (@wikipedia.org)

L'attrait pour la pratique grandissant, il devint nécessaire de réguler les compétitions et en 1881 naît l'Union Vélocipédique de France (UVF) afin de gérer le calendrier, une structure qui deviendra la Fédération Française de Cyclisme (FFC) le 20 Décembre 1940. Entre-temps, l'Union Cycliste Internationale (UCI) fut fondée à Paris le 14 Avril 1900 dans le but de régir le sport cycliste dans le monde et instaurer une politique globale pour tous les pays. Depuis cette époque, le cyclisme a beaucoup changé, et ce sport fait aujourd'hui partie des plus populaires. De nombreux types de pratiques sont apparus au cours du temps et ils se sont développés jusqu'à créer des disciplines à part entière ayant chacune ses spécificités. On retrouve aujourd'hui quatre grands domaines de pratiques du cyclisme : la Route, la Piste, le BMX (*Bicycle Motocross*) et le VTT (Vélo Tout-Terrain).

Les routiers participent à différents types de course (à étapes, classique, contre-la-montre) qui se déroulent toujours sur des voies goudronnées et privilégient souvent les longues distances et le travail d'équipe. Les épreuves des pistards se déroulent en intérieur, au sein de vélodromes et elles permettent ainsi de maîtriser l'environnement afin de privilégier l'expression de la technique. Le BMX est une discipline qui va mettre en avant le côté spectaculaire, avec des concours de figures ou des courses très rapides et acrobatiques sur des parcours créés de toute pièces, constitués d'un enchaînement de bosses, de virages serrés et de sauts. Pour finir les vététistes sont les cyclistes qui se sont orientés vers la pratique sur les terrains naturels accidentés et dont les différentes courses ont pour point commun la diversité des situations proposées.

Le développement du vélo tout-terrain

Nous avons choisi de placer le VTT au cœur de nos travaux de recherches pour plusieurs raisons. Le contexte de pratique en pleine nature induisant de nombreuses phases en hors-piste, cela impose aux athlètes d'avoir un certain niveau physique mais aussi technique. Au-delà de l'aspect technique, il s'agit d'une activité où la dynamique de course va être variée et où l'adaptation au terrain va être une composante essentielle. Les nombreux changements de rythme ainsi que les obstacles à franchir introduisent une dimension tactique spécifique qui s'ajoute à la demande physique, élargissant un peu plus le nombre de facteurs d'influence.

Le VTT est un sport encore jeune qui est très populaire. Avec environ presque 3 millions de vélos vendus chaque année en France, dont un peu plus de 40% de VTT, le marché du cycle est important. La pratique bénéficie également d'une médiatisation de plus en plus importante, ce qui a pu conduire à un certain nombre d'évolutions réglementaires, accompagnées d'innovations technologiques. Avec la richesse des déterminants de l'activité et ses évolutions récentes, celle-ci incarne selon nous un domaine d'étude intéressant et innovant.

On situe l'apparition du VTT en tant que sport au milieu des années 1970, en Californie aux Etats-Unis. C'est plus précisément sur les pentes du Mont Tamalpais, situé au nord de San-Francisco dans le comté de Marin, que les premiers VTTs sont nés. Les inventeurs et les premiers pratiquants du VTT constituent un petit groupe de personnes dont les plus connues sont : Joe Breeze, Tom Ritchey, Gary Fischer et Charlie Kelly (voir figure 3). Ils créent en 1976 la « *Repack Race* », première course de VTT de l'histoire. Le nom de la course provient justement de la nécessité de recharger (*Repack* en anglais) les tambours de frein en graisse en cours de descente du fait de leur utilisation intensive qui la fait fondre. A cet instant il ne s'agit alors que de quelques personnes qui modifient leurs vélos de route afin de réaliser de simples descentes.



Figure 3. Premiers pratiquants du VTT

Le premier engin conçu spécifiquement pour la pratique tout-terrain en montagne est construit en 1977 par Joe Breeze et porte le nom de son inventeur : le *Breezer*. Il se caractérise par des pneus larges mais des roues de diamètre réduit tout comme son empattement plus court que les modèles routiers. Le guidon devient plus large afin de faciliter la maniabilité et on trouve également des développements plus petits qu'auparavant pour gérer plus facilement les parcours accidentés.



Figure 4. Le premier modèle de VTT : Le Breezer

Pendant quelques années encore le cycle tout-terrain n'est pas énormément reconnu, et il faut attendre le début des années 1980 pour sortir de la production artisanale et passer, grâce aux grandes marques du cycle, à la fabrication industrielle. C'est en 1983 que le VTT arrive en France, des modèles sont présentés en Savoie à la station de La Plagne par Stephane Hauvette. Il fonde alors l'Association Française de Mountain-Bike (AFMB) qui organise dès l'année suivante la première compétition officielle de VTT en France : le Roc D'Azur. Une autre étape importante dans la reconnaissance de ce sport est franchie en 1988 avec son intégration au sein de la Fédération Française de Cyclisme. Afin de gérer et d'organiser cette nouvelle pratique l'AFMB devient donc la Commission Nationale VTT.

Le monde du cyclisme tout-terrain poursuit son essor avec le développement des circuits de compétitions nationales et internationales, avec la création des Championnats du Monde en 1990, de la Coupe du Monde en 1991 et des Championnats de France en 1995. Finalement en 1996 le VTT, et plus particulièrement la discipline du Cross-Country, devient Olympique aux J.O. d'Atlanta. Elle va continuer à représenter le monde du VTT à chaque édition depuis et elle le reste encore aujourd'hui avec les derniers J.O. en date, ceux de Rio en 2016.



Figure 5. Photo du départ de la course de VTT dans la catégorie Elite Homme aux J.O. de Rio en 2016 (©Tim De Waele)

C'est donc une discipline sportive qui s'est internationalisée et une activité qui est devenue très compétitive. Les différents acteurs du domaine, et particulièrement le haut-niveau, ont donc la volonté de comprendre au mieux les caractéristiques du Cross-Country Olympique et ses besoins spécifiques, afin d'y répondre au mieux pour performer.

1.1.2. Le cross-country olympique (XCO)

Une discipline parmi d'autres

Comme nous avons pu le voir, il y a plusieurs catégories de cyclisme, et au sein de chacune d'entre elles, il existe de multiples formes de pratique. Dans le cas du VTT, la définition officielle donnée par le ministère le décrit comme « une activité sportive qui se caractérise par l'usage de la bicyclette sur terrain naturel accidenté » (Arrêté du 8 décembre 1995 modifié par l'arrêté du 19 février 1997, Ministère de la Jeunesse et des sports).

Ainsi, le VTT fait partie de la grande famille des sports de pleine nature, et les circuits sont par tradition situés dans des zones naturelles proposant la variété de paysages nécessaire à l'établissement des parcours. Plusieurs disciplines composent le domaine du VTT : la Descente (DH), le Four-Cross (4X), l'Enduro, le Trial, le Dirt et le Cross-Country (XC). Chacune d'entre elles met plus ou moins l'accent sur un aspect particulier de la pratique tout-terrain. Par exemple la descente exige de grandes qualités de pilotage afin de parcourir avec vitesse et précision de longues pentes parsemées d'obstacles. Autre illustration avec le trial qui demande aux athlètes de réaliser délicatement des franchissements extrêmement acrobatiques et nécessite surtout de l'équilibre. Mais la discipline la plus répandue est le XC, qui demande plus de polyvalence aux coureurs. D'après la Fédération Française de Cyclisme (FFC), le XC « est la discipline d'endurance du Vélo Tout Terrain, la variété des terrains rencontrés sur le parcours doit permettre l'expression des qualités techniques (pilotage, franchissement ...) et physiques des coureurs (gestion d'un effort avec des variations de rythme) » (« Site Officiel FFC », s. d.).

Les spécificités règlementaires du XCO

Sport Olympique depuis 1996 à Atlanta, elle est la seule discipline du VTT présent aux JO. Plusieurs formats de course se sont développés avec le temps, orientant la course vers l'endurance ou l'explosivité. On désigne la forme la plus courante comme étant le Cross-Country Olympique (XCO), en opposition par exemple au Cross-Country Eliminator (XCE) ou au Cross-Country Marathon (XCM). Mis à part le nombre de coureurs et plusieurs différences de règlement, c'est surtout en terme de distance à parcourir que ces variantes se distinguent : de 500m à 1 km pour le XCE, de 25 à 50 km pour le XCO et de 65 à 100 km pour le XCM. Le principe des courses de XCO est simple, tous les coureurs s'élancent en même temps (figure 5) depuis une zone initiale où ils sont alignés sur une grille de départ selon leurs classements et leurs titres. Lorsque le départ est donné, le but est d'arriver en premier à la ligne d'arrivée après avoir réalisé un certain nombre de tours de circuit dépendant de la catégorie des participants. Le parcours d'une épreuve de XCO doit être long d'environ 4 à 6 kilomètres et doit comporter des difficultés topographiques variées, tels que des modifications de la pente et de la surface du terrain, permettant de solliciter les qualités techniques et physiques des participants (« Règlementation UCI 2018 », s. d.). On peut donc retrouver une grande diversité de situations : à la fois de courtes portions étroites en sous-bois, des descentes raides au milieu de rochers (figure 6) ou des parties un peu plus longues et roulantes en cas de transitions.



Figure 6. Le cycliste français Julien Absalon lors d'une descente technique d'un parcours de VTT XCO (©Pedro Cury)

Les tracés des courses sont établis par les responsables fédéraux et doivent ensuite être validés par l'UCI pour être labélisés et pouvoir ainsi intégrer le circuit officiel des étapes de compétitions nationales et internationales. Il n'y a pas d'obstacles particuliers devant se retrouver obligatoirement sur tous les parcours, mais ils doivent tous présenter de la diversité dans les situations proposées, afin de solliciter l'ensemble des capacités des coureurs. L'ensemble de ce cadre réglementaire particulier amène les athlètes à évoluer dans un contexte vraiment différent des autres disciplines et à s'entraîner spécifiquement pour faire face à des contraintes variées. La discipline du XCO est encore jeune mais elle continue de se modifier, et plus particulièrement depuis quelques années.

Une évolution vers un XCO « moderne »

On constate une forte évolution de la discipline au cours de la dernière décennie qui semble chercher à se moderniser pour proposer un format plus télévisuel et attractif du fait de sa médiatisation récente. Il n'est pas rare que les compétitions majeures telles que les championnats du monde rassemblent plusieurs milliers de spectateurs (figure 7) et de téléspectateurs (RedBull TV). Cette recherche du spectaculaire a entraîné une modification progressive des circuits qui a amené les parcours à être de plus en plus rapides. Aujourd'hui les épreuves de références sont plus proches de l'heure et demi, comme l'attestent les résultats des Jeux Olympiques de Londres en 2012 (1h29min07sec) et ceux de Rio en 2016 (1h33min28sec), alors que pour les précédentes éditions le temps de course était autour des deux heures : Pékin 2008 (1h55min59sec), Athènes 2004 (2h15min02sec), Sydney 2000 (2h09min02sec), Atlanta 1996 (2h17min38sec). Cette évolution a d'ailleurs été inscrite au sein du règlement international qui précise qu'actuellement la durée des épreuves de XCO doit se rapprocher le plus possible d'un temps de course de 1h20min à 1h40min pour la catégorie élite (« Règlementation UCI 2018 », s. d.).



Figure 7. Le cycliste suisse Nino Schurter lors du championnat du monde 2018 de XCO à Lenzerheide (Suisse) (@VeloVert.com)

Les modifications règlementaires ont eu un impact direct sur la pratique, autant au niveau temporel qu'au niveau du terrain. Dans cette optique, les aménagements de pistes et les ajouts d'obstacles artificiels se multiplient et peuvent même aboutir à la création de portions entières (figure 8). Ces évolutions sont susceptibles d'avoir des répercussions importantes concernant la nature de l'activité. Il semble alors pertinent de se demander si les déterminants de la performance en XCO sont restés les mêmes ou non. D'un point de vue technologique aussi de nombreux progrès ont aussi été fait. Ces avancées permettent aux coureurs d'aller toujours plus vite avec un allègement généralisé et des systèmes de suspension plus performants. Ce changement de la nature de l'activité a également pu être constaté par les athlètes de haut niveau tel que le français Julien Absalon, multiple champion du monde et olympique, qui a déclaré après la manche de la coupe du monde de Dalby Forest en 2010 que « l'on assiste à la naissance d'un nouveau sport ».



Figure 8. La cycliste suisse Sina Frei lors du championnat du monde U23 2018 de XCO à Lenzerheide (Suisse) (@VeloVert.com)

Afin de pouvoir étudier les paramètres de l'activité, il apparaît nécessaire de connaître les multiples aspects de la performance sportive et les facteurs d'influence de celle-ci. Nous pourrions ainsi constater (ou non) l'évolution des caractéristiques du XCO.

1.2. La performance en cyclisme

1.2.1. La pluralité des déterminants de la performance

Il est important de commencer par définir précisément la notion de performance sportive, car c'est une notion qui peut s'interpréter de multiples manières. La représentation collective de ce terme se rapproche le plus souvent d'un résultat, sous forme de score ou de classement, qui s'inscrit dans un contexte codifié par des règles particulières. Au cours du temps, de nombreux auteurs se sont intéressés à la performance et ont tenté de décrire cette notion et d'en expliquer les différents paramètres d'influence. C'est par exemple le cas de Matveiev (1983) qui déclare que « la performance sportive met en évidence les aptitudes d'un athlète dans un sport donné et permet de l'apprécier en fonction de critères connus (but, mesure, points) ». On peut noter là qu'il met en avant l'aspect de jugement de l'action au travers d'une règle prédéfinie. D'autres chercheurs tels que Platonov (1988) voient la performance comme étant « l'expression des possibilités maximales d'un individu dans une discipline à un moment donné ».

Dans ces définitions, on observe que leurs auteurs se sont concentrés sur la performance en tant que résultat mesurable, et n'ont pas abordé la dimension de réalisation du geste sportif. Dans cette optique, certains chercheurs ont essayé, depuis le début du 20ème siècle, d'élaborer des modèles explicatifs de la performance, représentant de manière structurée les multiples facteurs l'influençant. Peu à peu, ces sociologues du sport ont cherché à englober un maximum de paramètres et ont parfois élaboré des modèles très complexes. Parmi la multitude de modèles établis, on en trouve un conçu par Weineck (1997), et dont l'organisation nous semble à la fois claire, complète et pertinente (Figure 9).

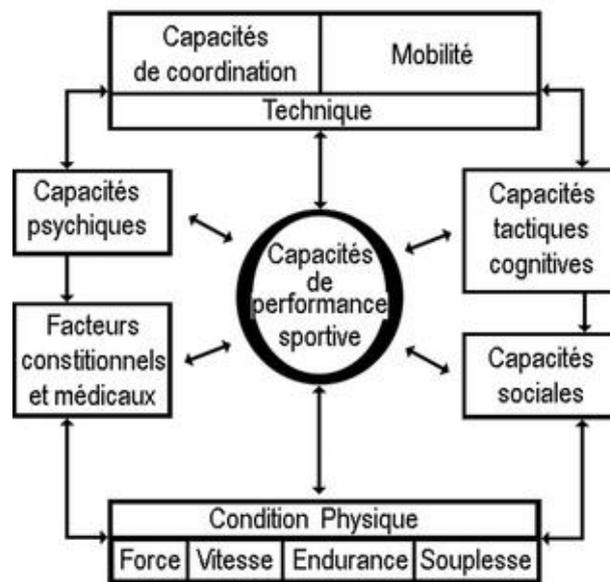


Figure 9. Modèle de la performance (d'après Weineck, 1997)

Lors de ses recherches, il déclare que « seul un développement harmonieux de tous les facteurs déterminants de la capacité de performance permet d'atteindre le niveau optimal de performance individuelle ». C'est une mise en lumière de la multitude de paramètres qui interviennent et de l'importance de chacun d'entre-eux. Il le confirme d'ailleurs en signalant que « la capacité de performance sportive [...] est conditionnée par une pluralité de facteurs spécifiques » (1997). Les paramètres d'influence sont à la fois nombreux et variés. Ils peuvent être regroupés selon le domaine auquel ils appartiennent (physique, psychique, technique, ...), mais les appellations changent souvent selon les modèles. Dans tous les cas, l'aspect multifactoriel de la performance sportive rend son analyse scientifique complète relativement délicate. D'autant plus que ces facteurs sont plus ou moins impactants selon la discipline concernée. Une partie des déterminants de la performance tels que certaines données anthropomorphiques ou le contexte de pratique sont indépendants, mais la majorité est reliée à des caractéristiques que l'athlète est en mesure d'améliorer.

Il convient alors de déterminer avec soin les contraintes et exigences de la pratique afin de spécifier l'entraînement et d'optimiser la performance. Dans le domaine du sport cycliste, il faut prendre en compte le fait que nous étudions un complexe homme-machine et qu'il est donc nécessaire de faire attention aux paramètres des deux entités et à leur interaction. Le plus intéressant serait donc d'opter pour une approche multidisciplinaire pour essayer d'avoir

une vision la plus large et la plus juste possible. Cependant, aborder l'ensemble des domaines d'influence paraît complexe au vu de leur nombre important. Nous avons donc fait le choix de nous concentrer sur ceux qui sont les plus susceptibles d'avoir été affectés par l'évolution de la discipline (biomécanique, physiologique et technologique), et d'en écarter certains hors de nos compétences (psychique, médical, cognitif, social).

Dans le cadre de cette étude, nous avons tenté de décrire les caractéristiques actuelles du VTT XCO, suite aux évolutions récentes de la discipline. Nous nous sommes donc plus particulièrement intéressés aux déterminants de la performance les plus susceptibles d'avoir été affectés par cette évolution. Nous avons ainsi développé notre analyse d'un point de vue biomécanique, physiologique et technologique.

1.2.2. Les facteurs biomécaniques

La biomécanique est le domaine qui s'intéresse au geste technique du mouvement sportif. Comme le décrit Chabroux (2010) dans ses recherches, la biomécanique « *étudie le mouvement du corps humain de la même façon que la mécanique élémentaire examine le mouvement général de tous les corps, en faisant appel aux mêmes concepts, aux mêmes lois et en utilisant les mêmes méthodes* ». Il s'agit donc d'un domaine concernant les mécanismes liés à la création du mouvement ainsi qu'aux contraintes et résistances s'y opposant.

Le contexte spécifique du cyclisme peut sembler simple au premier abord du fait du caractère contraint et cyclique du mouvement de pédalage mais cela est bien plus complexe qu'il n'y paraît. L'objectif recherché est la propulsion de l'ensemble cycliste-vélo vers l'avant et donc la création de mouvement et l'augmentation de la vitesse de déplacement. Pour décrire les paramètres biomécaniques importants en cyclisme, nous pouvons nous appuyer sur les recherches de Grappe (2009) qui décrit la vitesse de déplacement (V_d) comme dépendant à la fois des forces motrices appliquées à la pédale (F), de la longueur de manivelle (L), de la fréquence de pédalage (ω), et de la résistance totale à l'avancement (RT). Soit l'équation suivante :

$$V_d = (F \cdot L \cdot \omega) / RT \quad (1)$$

On peut alors séparer les paramètres relatifs à la technique de pédalage d'un côté (Force et Cadence) et la résistance à l'avancement de l'autre. Cette dernière peut se décomposer comme étant la somme des résistances liées à la friction de l'air (trainée aérodynamique), aux frottements au sol (résistance au roulement) et au poids (force de gravité). Soit l'équation suivante :

$$R_{Totale} = R_{Aérodynamique} + R_{Roulement} + R_{Gravité} \quad (2)$$

Que l'on peut également illustrer de la manière suivante (avec R = force de réaction du sol) :

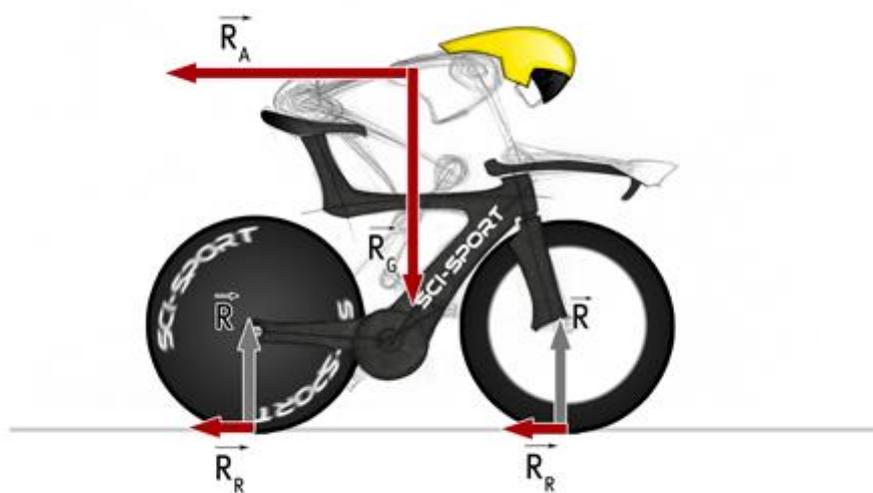


Figure 10. Ensemble des forces opposées à l'avancement du cycliste (@Sci-Sport.com)

Ainsi dans le cadre de la recherche de performance, le but va être de minimiser les résistances tout en augmentant les forces motrices. Concernant l'effet du poids, il s'agira de contrôler au mieux les caractéristiques morphologiques pour s'assurer d'être le plus léger possible tout en conservant une masse musculaire suffisante, mais nous y reviendrons plus tard. Pour la résistance au roulement, c'est surtout technologiquement que l'on va pouvoir agir en sélectionnant le matériel le plus adapté au niveau de la section du pneu, de la jante ou du gonflage (Macdermid et al., 2014) dans le but d'avoir le meilleur rendement possible. C'est donc principalement au niveau de l'aérodynamisme que l'athlète peut agir, surtout au cours de la pratique car des modifications de posture peuvent influencer la force de trainée.

C'est notamment le cas dans les situations où la vitesse est importante comme dans les courses de contre-la-montre sur route (Chabroux, 2010), mais c'est un effet qu'il faut modérer dans d'autres disciplines, notamment en XC. Cependant la position n'est pas liée qu'au caractère aérodynamique car la pratique cycliste n'est que rarement statique. La position est réglée surtout de manière à ce que le coureur puisse pédaler de manière confortable et efficace. Elle est déterminée généralement par deux mesures (Belluye & Cid, 2001) que sont la hauteur de selle (par rapport à l'axe du pédalier) et l'avancée du guidon (par rapport à la selle). Mais au-delà des considérations posturales et technologiques, c'est avant tout la technique de pédalage qui constitue le cœur de cette activité.

La technique de pédalage

Son analyse passe tout d'abord par l'observation de la cinématique du cycle de pédalage (figure 11). Le cycle en lui-même se décompose généralement en quatre phases bien distinctes : la poussée (en avant / appui), la transition basse, la traction (en arrière / tirage) et la transition haute. Les phases de transition sont parfois également appelées « points morts » car elles correspondent aux instants où la force transmise est la plus faible.

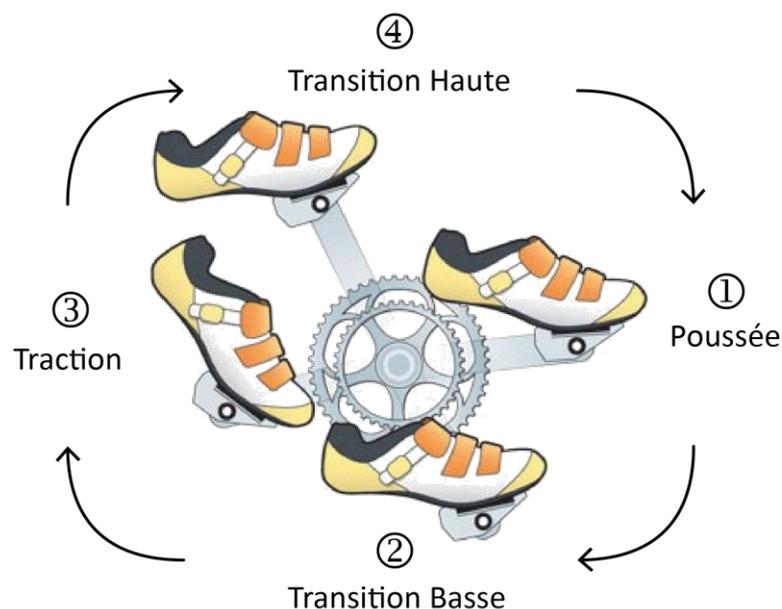


Figure 11. Cinématique du cycle de pédalage (Adapté de ©MensHealth.co.uk)

Le cycle peut se décrire plus précisément durant ces 4 phases au travers de la gestuelle, du rôle des muscles et de la force transmise aux manivelles.

1] La poussée

Phase la plus efficace sur le plan biomécanique, elle est très rentable car la grande majorité de la force appliquée sur la pédale est transmise à la manivelle. Le principe est d'emmener la jambe vers l'avant par une pression sur la pédale vers le bas. La poussée consiste en une extension de l'articulation du genou qui fait principalement intervenir le grand fessier, le quadriceps et le triceps sural sous le contrôle également des ischio-jambiers (Ericson & Nisell, 1988). En fin de poussée un abaissement de la pointe de pied est initié afin de continuer à orienter la force appliquée de manière optimale. Une fixation du bassin par un solide gainage (abdominaux et carré des lombes) est nécessaire à l'efficacité de la poussée et à la stabilité de la zone lombaire.

2] La transition basse

Alors que la poussée se termine, les fléchisseurs plantaires du pied continuent leur action afin d'orienter la force de manière optimale et d'accompagner le mouvement des segments vers l'arrière. Cette phase de transition est surtout le moment où l'extension de la cheville va s'effectuer complètement afin de propulser le pied en arrière et aider à fluidifier la mouvement en élevant progressivement le talon.

3] La traction

Durant cette phase, une flexion du genou et de la hanche est réalisée essentiellement par les ischio-jambiers, qui sont extenseurs de hanche (Raasch & Zajac, 1999). La production d'une force de traction permet d'apporter un supplément non-négligeable de puissance motrice par rapport à la poussée. Le psoas-illiaque joue également un rôle important comme initiateur de la flexion de hanche et le tibial antérieur en tant que releveur du pied. Le rendement est le plus faible lors de cette phase et c'est la partie la moins instinctive du geste de pédalage.

4] La transition haute

Dernière phase concluant le cycle par la réalisation d'une flexion du pied, permettant de finaliser la phase de traction, de pousser en avant et de repositionner le pied pour le début du prochain cycle. Lors de cette fin d'élévation, ce sont surtout les fléchisseurs de hanche qui vont continuer de travailler avec les muscles dorsiflecteurs du pied et les extenseurs du genou se mettent en action afin de replacer la jambe vers l'avant en position de poussée.

L'identification des muscles impliqués

De manière schématique, on peut représenter les principaux muscles concernés dans le geste et leurs rôles respectifs (figure 12). Les groupes musculaires impliqués dans le mouvement des trois segments du membre inférieur sont tous sollicités au cours du pédalage.

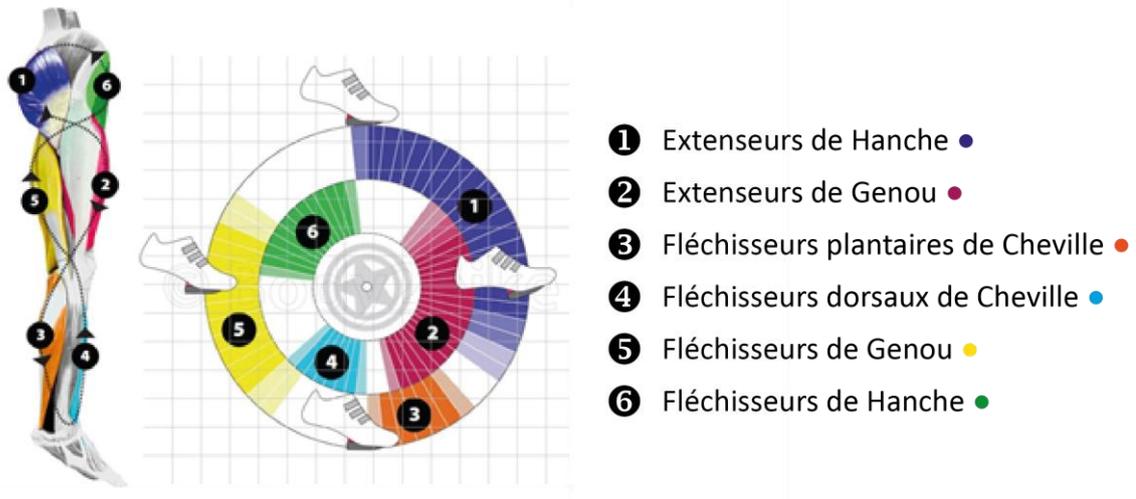


Figure 12. Zone d'activité globale des muscles de la jambe par groupes fonctionnels
(Adapté de @RobMuller)

Grâce à différentes techniques expérimentales, il est même possible d'aller plus loin et de détailler l'activité des différents muscles au cours du temps. C'est par exemple le cas de l'électromyographie (EMG) de surface, qui permet d'enregistrer un niveau d'activation des fibres musculaires superficielles via des électrodes placées sur la peau. Ce signal EMG correspond à la somme des potentiels d'actions des unités motrices recrutées. Cette technique d'expérimentation indolore a pu permettre d'établir une chronologie plus précise de l'activation des principaux muscles impliqués lors du pédalage. Il est ainsi possible de détailler les patterns d'activité de chacun des muscles les plus importants pour le geste de pédalage, ou tout au moins ceux qui sont en surface. L'ensemble des activités des muscles lors du pédalage a par exemple été étudié et défini schématiquement (voir figure 13) par Childers (Childers et al., 2009).

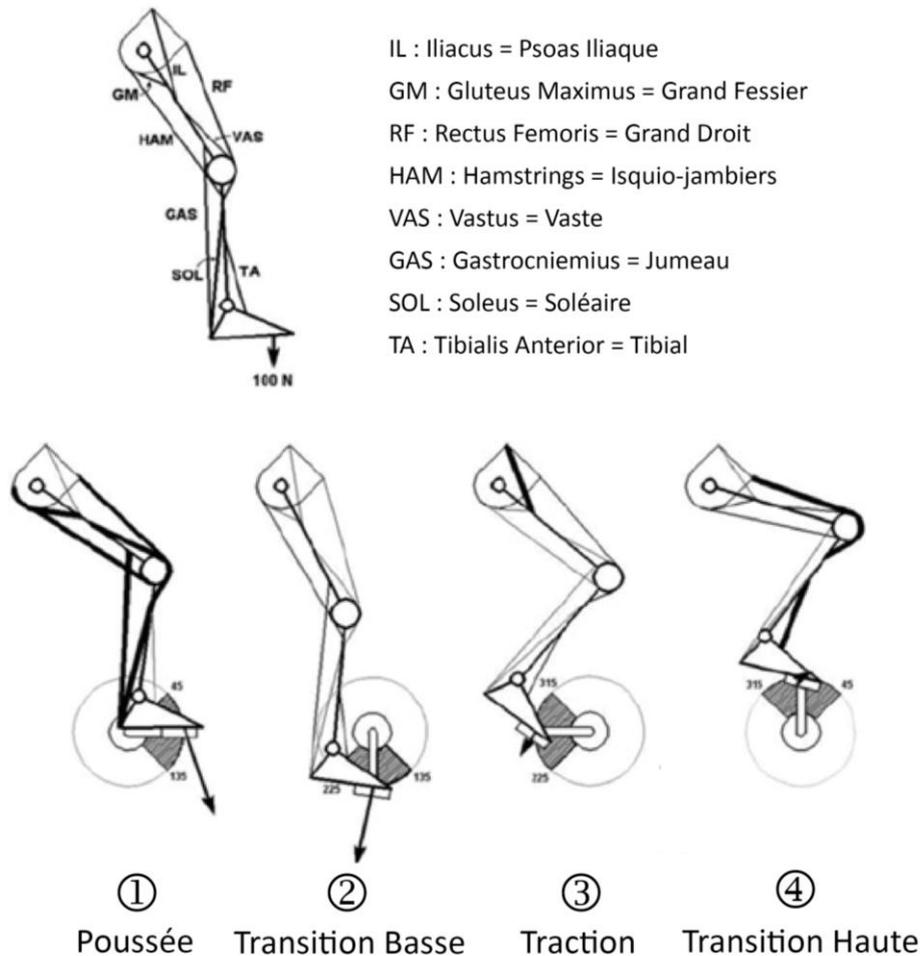


Figure 13. Représentation graphique des muscles actifs dans chaque phase du cycle, selon leur intensité, les muscles pouvant être très actifs (épais noir), modérément actif (fin noir) ou non actif (fin gris). (Adapté de Childers, 2009)

Ce qui est intéressant ici, c'est qu'il y est montré la position successive du membre inférieur, les muscles impliqués dans chaque phase et leur niveau d'activité, mais aussi et surtout la direction et l'amplitude de la force appliquée à la pédale qui changent au cours du geste.

L'évolution des forces lors du pédalage

Ainsi, lors de la révolution complète du pédalier, la répartition des forces exercées sur les pédales par le cycliste change de direction et d'intensité. La technique de pédalage s'observe d'ailleurs en premier lieu au niveau de cette interaction entre le pied du cycliste et la pédale. Le pattern de ces forces évolue selon les conditions de pratiques mais également selon les athlètes. On peut voir par exemple sur les figures 14a et 14b issues de recherches de Kautz et

al (1991) l'évolution de l'orientation et de l'intensité de la force appliquée sur la pédale au cours du cycle, pour deux sujets différents dans les mêmes conditions. Le sujet CB, représenté en figure 14a, produit un couple propulsif important durant l'ensemble de la phase poussée et la phase de traction est également propulsive. Le sujet SG, représenté en figure 14b, présente une contribution plus importante de force en phase de poussée, cependant lors de l'élévation il ne présente pas de traction, donc pas d'apport moteur supplémentaire.

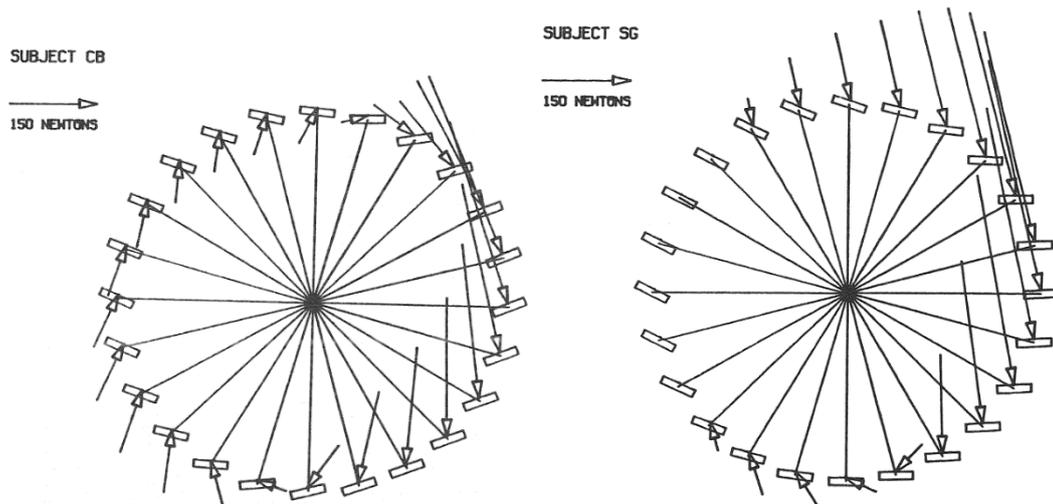


Figure 14. Pattern de pédalage de 2 cyclistes élites (a et b) illustrant la force totale appliquée sur la pédale au cours du cycle à une puissance de 200 W (D'après Kautz, 1991)

Il faut faire la distinction entre la force à la pédale et la force motrice. L'effort appliqué sur la pédale est intégralement transféré à la manivelle, mais seule la composante perpendiculaire à celle-ci représente la force motrice. Il est intéressant d'observer le détail de ces différentes forces ainsi que leur évolution au cours du cycle. La force normale, perpendiculaire au plan de la pédale, la force médio-latérale et la force antéro-postérieure sont les trois composantes de l'effort total que subit la pédale, qui est généralement étudié seulement en deux dimensions car les efforts médio-latéraux sont souvent négligeables. La somme de ces forces est nommée force résultante. La force effective est la partie utile de la force résultante, celle qui est orientée tangentiellement à la manivelle. C'est précisément l'objet d'une revue de littérature réalisée par Bini (2013), qui a rassemblé un grand nombre d'études à propos de l'efficacité des forces appliquées aux pédales.

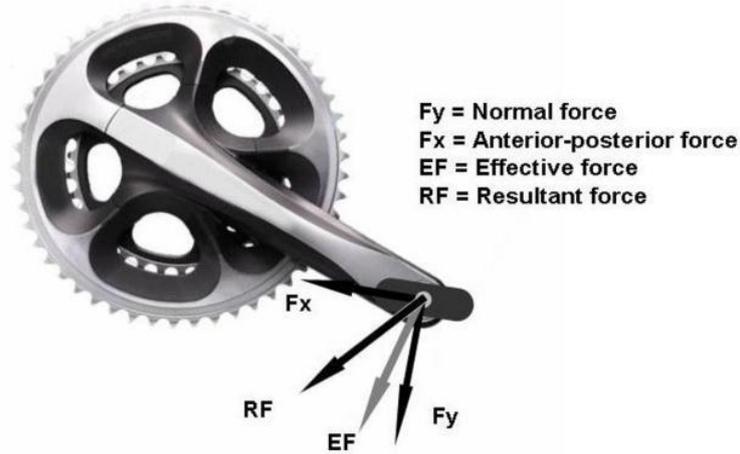


Figure 15. Représentation des composantes de la force appliquée à la pédale (d'après Bini et al, 2013)

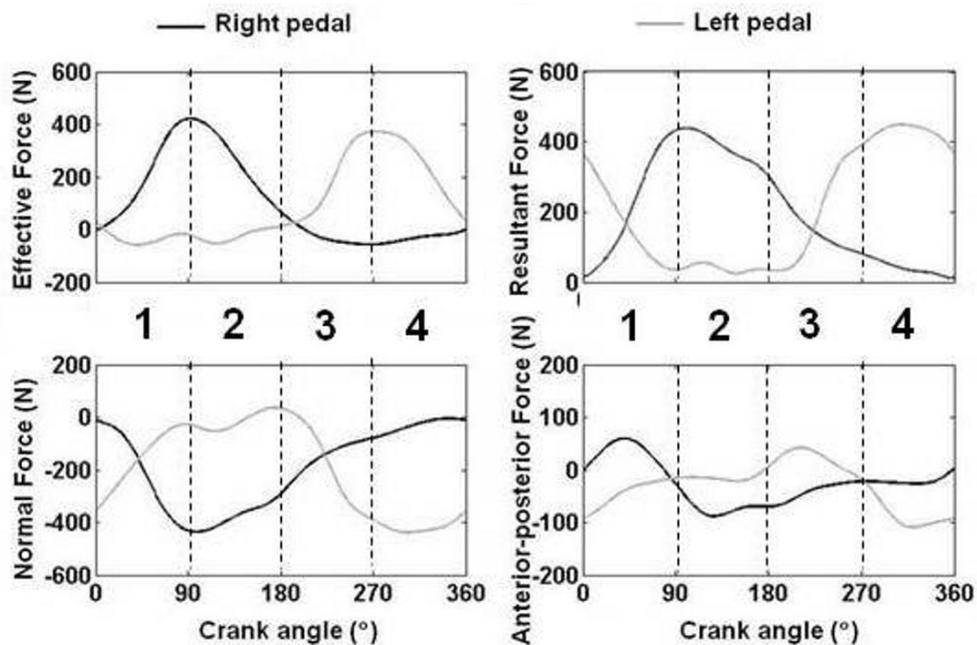


Figure 16. Evolution des composantes de la force appliquée à la pédale lors du cycle de pédalage (d'après Bini et al, 2013)

On peut voir ici un diagramme (figure 16) représentant les forces évoquées précédemment, avec la distinction de l'action des jambes gauche et droite. Pour la force effective, les valeurs positives indiquent une force propulsive. En ce qui concerne la force normale, les valeurs positives indiquent une force appliquée pour tirer la pédale. Finalement pour la force antéro-postérieure, les valeurs positives indiquent un effort effectué vers l'avant de la pédale.

L'idéal serait de tendre vers un cycle où les temps de transition seraient minimisés. La production de puissance se ferait alors de manière continue et le système serait optimisé. Afin de mieux visualiser les différences de technique de pédalage, certains ergocycles proposent une représentation polaire des données. Cela permet de montrer plus graphiquement la production de puissance en fonction de l'angle de la manivelle. Certaines études se sont intéressées à ce type de représentation de la technique de pédalage et à la manière dont elle évoluait selon les conditions. Dans leur étude, Schaffert *et al* (2017) présentent les différents patterns de pédalage identifiés selon le niveau de pratique des coureurs (figure 18).

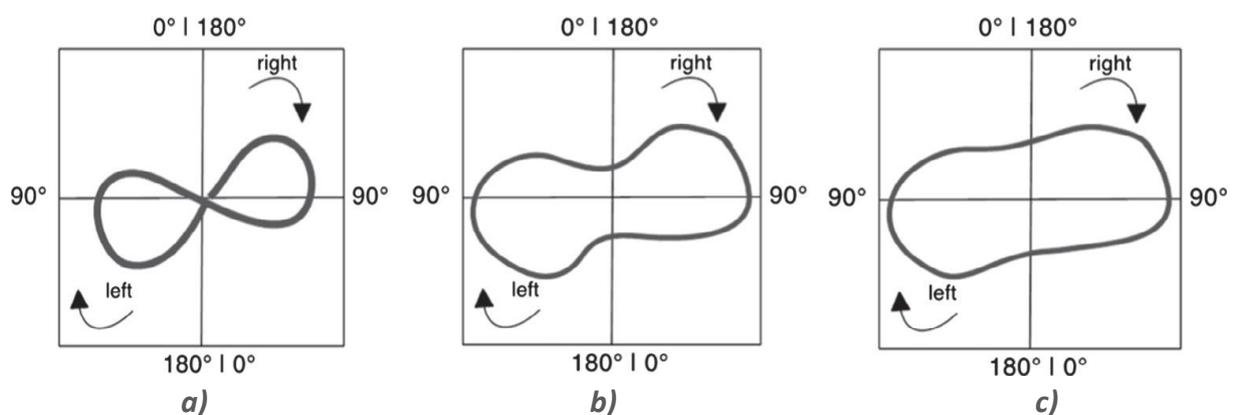


Figure 17. Tracé de la contribution de force selon l'angle de la manivelle pour des coureurs de niveaux différents, respectivement : débutants, confirmés, experts (a, b et c).

Si l'on prête attention à la figure 17a, représentant le pattern de pédalage chez les débutants, on peut observer une forme d'un huit incliné traduisant typiquement un mouvement de piston des jambes avec un appui important mais une faible traction. Cela cause une rupture de rythme et entraîne une perte d'énergie. Pour ce qui est des cyclistes experts, représentés en figure 17c, on constate que le huit incliné est désormais en forme d'ovale. La technique est excellente car les transitions entre phase de poussée et de traction s'effectuent de manière fluide et avec une bonne coordination entre les jambes. La catégorie des cyclistes confirmés, en figure 17b, représente l'intermédiaire, avec une technique de pédalage qui s'est développée mais qui n'est pas encore parfaite. Réaliser une propulsion avec un minimum de perte d'efficacité aux points morts c'est ce que l'on appelle familièrement : « pédaler rond ».

Le geste de pédalage est donc bien plus complexe qu'il n'y paraît au premier regard. Différentes actions vont s'enchaîner très rapidement lors du cycle et elles sont parfois même en opposition complète. Par exemple, l'athlète doit amener la pédale au point le plus bas avec une extension du genou mais arrivé à ce stade la force doit être appliquée vers l'arrière pour être perpendiculaire à la manivelle et donc efficace, et cela implique de réaliser une traction en fléchissant la hanche. Une bonne coordination est donc essentielle à acquérir lors du mouvement d'une jambe, mais également entre les membres inférieurs. En effet, les deux manivelles des pédales étant solidaires, la jambe controlatérale réalise un geste identique et en antiphase. Le pédalage des deux jambes est ainsi couplé et il a d'ailleurs été montré qu'une modulation de l'activité des fléchisseurs de la jambe existait grâce à un retour d'information de la jambe opposée sous la forme de signaux sensorimoteurs (Ting et al., 2000).

Les notions de puissance et de cadence

Comme nous avons pu le voir dans l'équation de la vitesse de déplacement, la force motrice et la cadence sont les paramètres déterminant la vitesse de déplacement qui sont liés à la technique de pédalage. Ces deux paramètres sont également associés au travers de la notion de puissance (P). Il s'agit de l'expression de l'effort fourni pour atteindre une certaine vitesse de déplacement, soit le produit du couple (C) qu'il transmet par la vitesse angulaire (ω). Le couple correspondant au produit de la force efficace (F_{Eff}) par la longueur de manivelle (L). La vitesse angulaire correspond à la cadence ou fréquence de pédalage (f) en rotation par minutes (rpm) convertie en radian par seconde. Soit les équations suivantes :

$$P = C * \omega \quad (3)$$

$$C = F_{Eff} * L \quad (4)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{60} * f \quad (5)$$

La puissance s'exprime en Watts et elle est très souvent utilisée comme paramètre de référence pour contrôler le niveau d'intensité d'un effort. Lorsque l'on observe l'évolution du couple durant le cycle de pédalage (figure 18), on constate que la production de la force efficace est réalisée majoritairement lors des phases motrices de poussée et de traction.

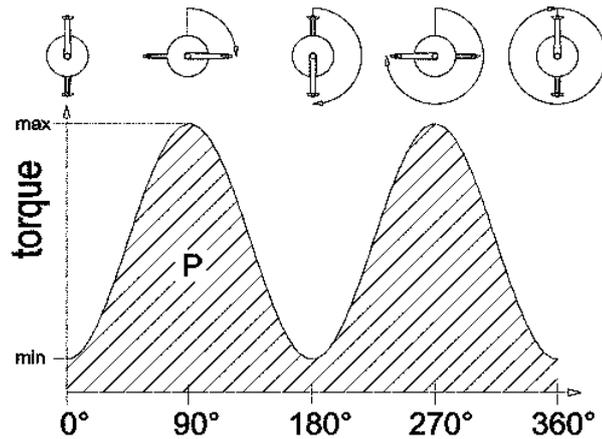


Figure 18. Représentation schématique de l'évolution du couple (*torque en anglais*) lors du cycle de pédalage (©RohloffCompany)

Après s'être plutôt intéressé à l'application des forces lors du pédalage, tournons-nous maintenant vers le second paramètre : la cadence. Celle-ci représente donc la vitesse de rotation du pédalier et plus précisément le nombre de cycles effectués par unité de temps. La variation de la fréquence de pédalage permet de faire face aux différentes sollicitations avec des avantages et des inconvénients divers selon la vitesse, pour une puissance donnée. Lorsqu'il ne reçoit aucune consigne particulière, un cycliste va naturellement utiliser une cadence de pédalage de confort avec laquelle il se sent à l'aise. Cette fréquence librement choisie est désignée comme étant la cadence préférentielle. Cependant celle-ci peut s'avérer inappropriée selon la charge imposée. Il n'existe donc pas une seule cadence que l'on pourrait qualifier d'optimale mais plutôt une multitude qui dépendent de la situation dans laquelle le coureur se trouve (Faria et al., 2005).

Par exemple, la fréquence de pédalage définie comme étant la vitesse à laquelle on est capable de développer un maximum de puissance est appelée cadence optimale mécanique. Elle peut être déterminée lors d'un test d'établissement des relations entre la force, la vitesse et la puissance d'un athlète. Le coureur va réaliser trois sprints de six secondes sur un ergocycle instrumenté dans plusieurs conditions de résistance avec une mesure du couple, de la fréquence de pédalage et de la puissance (Dorel et al., 2003). En affichant les données de force et de puissance mesurées en fonction de la cadence (figure 19), on obtient les relations force/vitesse (linéaire) et puissance/vitesse (parabolique). Par projection, on peut donc déterminer la vitesse optimale (VOpt) à laquelle la puissance maximale théorique est atteinte.

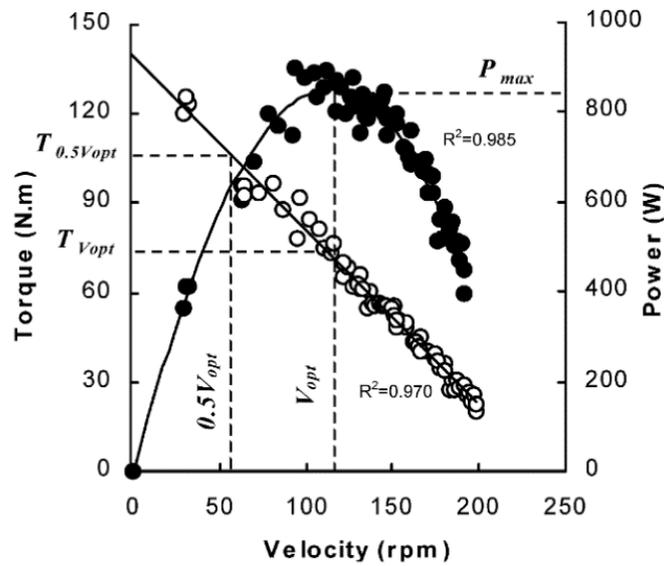


Figure 19. Représentation des relations force/vitesse et puissance/vitesse avec les données recueillies lors de 3 sprints de 6 secondes (d'après Dorel et al., 2003)

Une autre fréquence de pédalage remarquable qui a été souvent étudiée est la cadence optimale physiologique. Il s'agit de la vitesse à laquelle le coût énergétique est le plus faible et donc le pédalage le plus économique, pour une puissance donnée. Le principe est donc de mesurer la consommation d'oxygène (VO_2) à l'effort dans différentes conditions de cadence pour une puissance donnée (Busko, 2007).

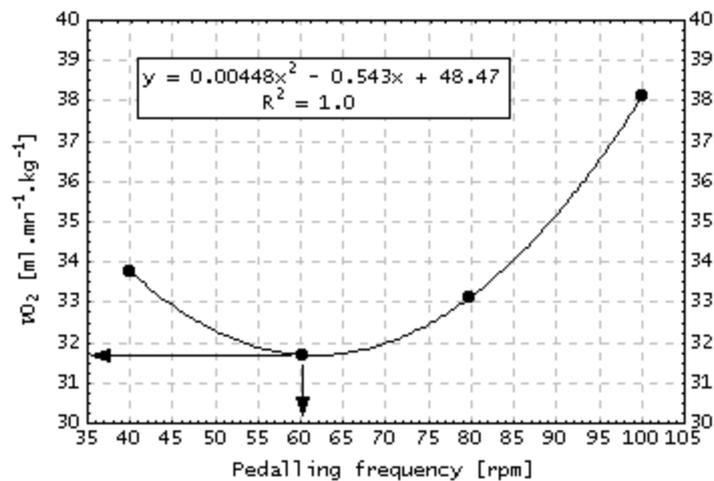


Figure 20. Représentation de la relation entre la consommation d'oxygène (VO_2) et la fréquence de pédalage lors d'un exercice sous-maximal à 250W (d'après Busko, 2007)

Après avoir réalisé une revue de littérature sur le sujet, Abbiss (2009) nous indique que la cadence à laquelle un athlète va consommer le moins d'énergie va le plus souvent se situer entre 50 et 80 Rpm alors que celle où il va développer le plus de puissance va se trouver entre 100 et 130 Rpm. De manière générale lorsqu'un coureur choisit librement son rythme, il va adopter naturellement une cadence intermédiaire allant de 90 à 100 Rpm. Il semblerait ainsi que le corps humain cherche à s'équilibrer naturellement en faisant la synthèse des avantages précédemment cités afin de trouver un compromis avantageux (Brisswalter et al., 2000). Un suivi de l'évolution de la cadence au cours de la pratique pourrait ainsi permettre de mieux comprendre les mécanismes d'adaptation à l'effort en course.

Nous avons pu voir que différents paramètres biomécaniques entrent en jeu dans la réalisation du geste de pédalage, et plus généralement dans la pratique du cyclisme. A présent, nous allons nous intéresser à l'aspect physique de la performance.

1.2.3. Les facteurs physiologiques

Dans le domaine physiologique, nous allons aborder différentes notions concernant les aptitudes biologiques et énergétiques. C'est en particulier les paramètres neuro-musculaires, respiratoires et cardio-vasculaires qui vont être analysés, ce qui va correspondre principalement aux capacités de force, de souplesse, d'endurance ou encore d'explosivité.

L'étude de la consommation énergétique

Les facteurs de performance physiologique en cyclisme ont fait l'objet de nombreuses études et il a été suggéré très tôt (Hill et al., 1924) que le débit maximal de consommation d'oxygène ($VO_2\max$) et la puissance maximale aérobie (PMA) étaient parmi les déterminants principaux pour les sports d'endurance. Cette PMA n'est pas la puissance maximale que l'on peut développer par exemple lors d'un sprint, mais elle correspond au niveau atteint au maximum de la capacité aérobie du cycliste. Elle peut être évaluée grâce à un test d'intensité progressive par palier réalisé souvent avec la mesure des échanges gazeux en plus. L'équation de base de détermination de la consommation d'oxygène est la suivante :

$$VO_2 = V_E * (FIO_2 - FEO_2) \quad (6)$$

La consommation d'oxygène (VO_2) est égale au produit de la ventilation (VE) par la différence entre la fraction inspiratoire en oxygène (FIO_2) et la fraction expiratoire en oxygène (FEO_2). On la mesure en litres par minute mais compte tenu de la diversité morphologique elle est couramment normalisée en fonction de la masse de l'athlète ce qui donne des millilitres par minute et par kilo. La VO_2 est considérée comme maximale (VO_{2max}) si plusieurs critères sont réunis. Il doit y avoir un plafonnement de la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque doit être proche de sa valeur théorique maximale : $FC_{max} = 220 - \text{âge}$ en battements par minutes, d'après la formule de Haskell et Fox (1968). De plus, la lactatémie doit être égale ou supérieure à 9 mmol/L de sang et un quotient respiratoire (VCO_2/VO_2) supérieur à 1,1 (Lacour & Flandrois, 1977).

Cela permet de déterminer la VO_{2max} qui correspond donc à la limite à laquelle un athlète n'arrive plus à resynthétiser d'ATP (Adénosine Triphosphate), énergie nécessaire à la contraction musculaire, uniquement par voie oxydative (Billat, 2013). Elle dépend des possibilités de prélèvement (au niveau pulmonaire), de transport (au niveau cardiovasculaire) et d'utilisation (au niveau musculaire) de l'oxygène nécessaire à la production d'énergie par oxydation. Pour donner un ordre d'idée, on estime qu'un individu sédentaire aura une valeur aux alentours de 40 ml/min/kg alors qu'un sportif de haut-niveau s'approchera des 80 ml/min/kg. Des études ont montré que la VO_{2max} était plus importante chez des athlètes entraînés en endurance comme les cyclistes (Saltin & Astrand, 1967).

Les seuils physiologiques

Certains paliers physiologiques sont peu à peu franchis avec l'augmentation de la durée et de l'intensité de l'exercice, et ils sont le reflet des capacités de gestion de l'effort du corps humain. Pour produire la puissance nécessaire à la réalisation d'une action, différentes filières énergétiques sont sollicitées en fonction de la durée de cet effort, comme décrites par Howard (1974) et présentée en figure 21.

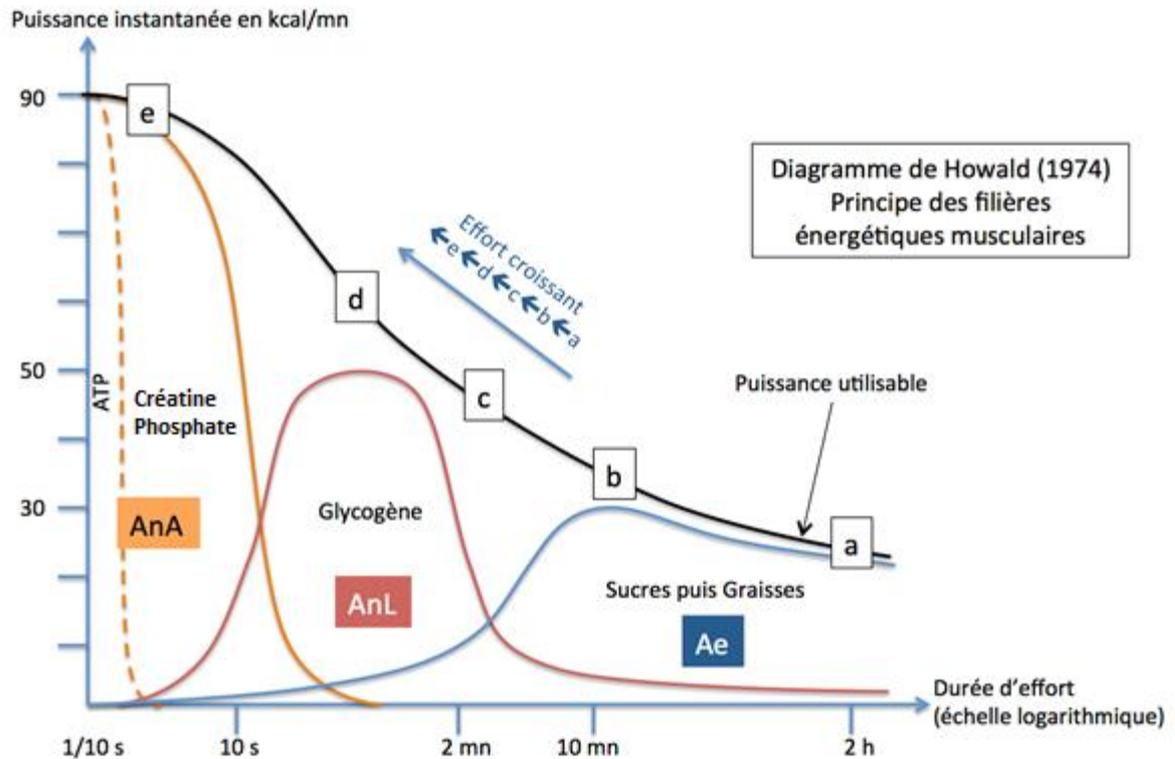


Figure 21. Présentation de l'évolution de la puissance développée en fonction de la durée de l'effort et filières énergétiques correspondantes (Ae = Aérobie ; AnL = Anaérobie Lactique ; ANA = Anaérobie Alactique) (@krhealth.wordpress.com)

Lors d'un exercice d'intensité progressive (par exemple une épreuve d'effort), un athlète va commencer par de faibles niveaux de difficulté pour lesquelles il va utiliser la filière aérobie de production d'énergie (de *a* à *b*). La ventilation va s'accroître de manière proportionnelle à l'intensité. Puis lorsque l'effort va devenir plus important, il va faire appel à la glycolyse anaérobie entraînant l'apparition d'acide lactique (vers *c*). A ce moment, la ventilation va subir une première inflexion et s'accélérer afin d'éliminer l'excès de CO₂. C'est ce que l'on appelle le seuil aérobie (entre *c* et *d*) qui apparaît entre 60% et 80% de VO₂_{max} et avec un taux de lactates qui reste faible (≈ 2mmol) et stable. C'est la zone d'endurance fondamentale de récupération. Ensuite, on accumule progressivement des lactates, mais l'exercice peut se poursuivre durant 30 à 60 minutes selon que l'on soit sédentaire ou sportif entraîné. C'est la zone dans laquelle il est possible de travailler la capacité aérobie (appelée zone transitionnelle aéro-anaérobie). Puis, l'effort continuant de s'intensifier, la contribution du métabolisme anaérobie s'accroît rapidement avec une augmentation brutale de la production de lactate face à laquelle les systèmes tampons du corps humain luttent mais ne peuvent tenir indéfiniment. C'est ce que

l'on appelle le seuil anaérobie (entre *d* et *e*) qui apparaît entre 80 et 95% de VO_{2max} et environ 4 mmol de lactates. Au-delà de cette intensité, c'est la zone de développement de la puissance anaérobie, et le test d'effort se termine lorsqu'il arrive à épuisement et s'arrête de lui-même. L'intérêt d'explicitier et de comprendre ces seuils physiologiques réside dans le fait que ces ceux-ci apportent des informations sur la capacité du sportif à maintenir un pourcentage élevé de VO_{2max} ou de PMA.

L'importance de la normalisation des valeurs

Toutefois l'ensemble des valeurs physiologiques maximales n'est pas forcément en lien direct avec la performance. Impillizzeri et al (2005) ont par exemple montré que la PMA et les puissances relatives aux seuils n'étaient que faiblement corrélées avec la performance chez les vététistes de haut niveau. D'autres études vont dans ce sens telle que celle de Gregory et al (2007) qui met en avant une plus grande significativité des valeurs relatives comme facteurs prédictifs de la performance, plutôt que les valeurs maximales absolues. Par exemple, lors d'une course de contre-la-montre en cross-country, les valeurs de pic de puissance relatives au poids de corps sont plus corrélées que les valeurs absolues (0.93 vs 0.64, avec $p < 0.05$). En effet, le cyclisme est un sport où l'athlète doit produire un effort pour créer du mouvement mais il doit à la fois déplacer sa machine et son propre corps. Il fait donc face au paradoxe entre être le plus léger pour avoir moins de poids à emmener ou être plus musculeux pour développer plus de puissance. Il y a donc un compromis à trouver en regardant surtout les performances normalisées selon le poids de corps plutôt que les capacités musculaires absolues. Les recherches de Bejder et al. (2018) confirment que la performance en XCO est liée à VO_{2max} relative au poids de corps et à la résistance à la fatigue lors d'un sprint de 30 secondes.

Ainsi, l'étude des paramètres physiologiques nous renseigne sur la nature de l'effort demandé aux coureurs et sur leurs adaptations. Afin de compléter notre analyse de la performance, il nous faut désormais observer plus en détail le couple homme-machine formé par le coureur et son vélo, et plus particulièrement le matériel utilisé.

1.2.4. Les facteurs technologiques

La performance sportive dépend également de l'interaction entre l'athlète et son matériel. Dans le contexte du cyclisme, l'utilisation d'outils et de technologies différentes selon les concurrents est autorisée. Cela permet aux coureurs de sélectionner le matériel le plus adapté au contexte de pratique, comme par exemple le style de suspension, le type de transmission, les dimensions du cadre et d'autres réglages comme la position de pilotage.

Nous avons vu précédemment que l'aspect organisationnel de la discipline avait fortement évolué dans les dernières années, mais ce n'est pas le seul aspect. Actuellement, on peut dire que le matériel a fait également un bond en avant, que ce soit au niveau des machines ou des outils d'entraînement, et tout cela participe à l'amélioration des performances des athlètes. Les progrès technologiques effectués ont permis d'apporter une plus grande diversité de réglages et d'apporter des ajustements plus fins au matériel des coureurs. Outre les améliorations constantes en terme de matériaux de construction afin d'être de plus en plus léger mais toujours aussi résistant, on peut noter 3 grandes avancées qui ont été importantes pour la discipline.

Les systèmes de suspensions

La première concerne le type de cadre et plus précisément le système de suspension. Les vélos de XCO ont tous une suspension à l'avant intégrée dans la fourche afin d'absorber les chocs plus ou moins importants liés aux irrégularités du terrain. Mais par la suite certains modèles ont été créés avec l'ajout d'une seconde suspension, cette fois-ci à l'arrière, afin de désolidariser les mouvements de la partie arrière de l'engin. On fait ainsi la distinction entre les cadres « semi-rigides » et les « tout-suspendus » (figure 19). Le principe de ce dernier est d'apporter un meilleur confort à son utilisateur en absorbant une partie des vibrations, provenant du contact entre la roue arrière et le sol, et en évitant qu'elles soient transmises à la selle. Cette souplesse supplémentaire va aussi permettre une meilleure adhérence de la roue arrière et améliorer la maîtrise du vélo, car la roue arrière restera ainsi plus souvent en contact avec le sol.



Figure 22. Un VTT à cadre semi-rigide (à gauche) et un VTT à cadre tout-suspendu avec une suspension arrière (à droite) (@Specialized)

Des études ont montré que les coureurs ressentent un meilleur confort avec un tout-suspendu par rapport à un semi-rigide, et même que leur dépense physiologique était moindre sur terrain accidenté. Cela s'avère très intéressant pour franchir les passages très techniques, mais ce type de cadre a également ses inconvénients. Tout d'abord, la suspension supplémentaire ajoute un poids non négligeable (de l'ordre d'un kilogramme), mais surtout elle entraîne un effet négatif de dispersion d'énergie appelé « pompage » (Nishii et al., 2004). Le cadre ayant plus de souplesse du fait de son articulation arrière, il va effectuer un mouvement de haut en bas lors de l'appui sur la pédale et il va y avoir une perte lors de la transmission de la force de poussée.

Une analyse des différents systèmes d'absorption des chocs en VTT par Nielens et Lejeune (2004) montre que la double suspension apporte plus de confort de pratique et un meilleur contrôle vis-à-vis des variations du terrain. Ils mettent également en avant que cet effet de pompage entraîne une dispersion d'énergie certaine. Celui-ci n'est pas forcément très important (voire négligeable) sur certains terrains roulants, mais il s'accroît à forte intensité. C'est ce qui est constaté par l'étude de MacRae (2000), qui met en avant des différences significatives au niveau de la puissance de sortie lors des phases de montée avec un effort supplémentaire pour la double suspension comparée au semi-rigide, que ce soit pour les valeurs absolues (266.1 ± 61.6 W vs 341.9 ± 61.1 W, $P < 0.001$) ou relatives (2.90 ± 0.55 W.kg⁻¹ vs 3.65 ± 0.53 W.kg⁻¹, $P < 0.001$). Mais malgré la présence de ces différences, cela ne se traduit pas par des différences significatives au niveau de la consommation d'oxygène (réponse physiologique) ni au niveau du temps nécessaire pour réaliser une course tout-terrain (performance). Il faut également prendre en compte que, avec les avancées technologiques et

les possibilités de blocage des suspensions, c'est un effet qui se ressent moins de nos jours par rapport aux premiers modèles (Macdermid et al., 2017). Par contre, c'est lorsque le terrain devient bosselé et irrégulier que le tout-suspendu montre ses qualités. C'est ce que met en évidence Titlestad (2006) en observant une dépense énergétique réduite avec un cadre à double suspension par rapport à un semi-rigide lors d'une session de pédalage à intensité sous-maximale sur un terrain accidenté recréé artificiellement.

Les formats de roue

Le second changement d'importance concerne le format des roues avec l'évolution des dimensions utilisés par certains coureurs. Pendant longtemps les roues utilisées avaient un diamètre de 26 pouces (660,4 mm), puis ont été introduits les roues de 29 pouces (736,6 mm) et plus récemment de 27,5 pouces (698,5 mm). Chacun de ces standards présente des avantages et des inconvénients. L'utilisation de roues en 26" semblait à l'origine la taille idéale pour l'usage en tout terrain, offrant de la maniabilité et de la rigidité pour un pilotage nerveux mais manquant de confort. Par la suite est arrivé le 29 pouces cherchant à combler les manques du 26", c'est-à-dire apporter un peu plus de confort grâce à un pneu à gros volume permettant de moins ressentir les irrégularités du terrain et d'améliorer le franchissement. L'adhérence et le rendement en sont également augmentés mais la taille et le poids supplémentaires deviennent aussi une gêne en terme de maniabilité du fait de l'envergure et de l'inertie. L'idéal serait donc de combiner l'ensemble des avantages de ces formats et c'est dans cette recherche de polyvalence que les roues de 27,5 pouces sont apparues. Tout comme le 29" elles ont une surface d'appui et un angle d'attaque plus importants que les 26" et de ce fait la roue s'enfonce moins dans les surfaces meubles (sable, boue, ..) et franchit plus facilement les obstacles. Elles ont un poids réduit et une rigidité plus grande que les 29" et donc une meilleure manoeuvrabilité accompagnée d'une capacité d'accélération plus importante (figure 23).

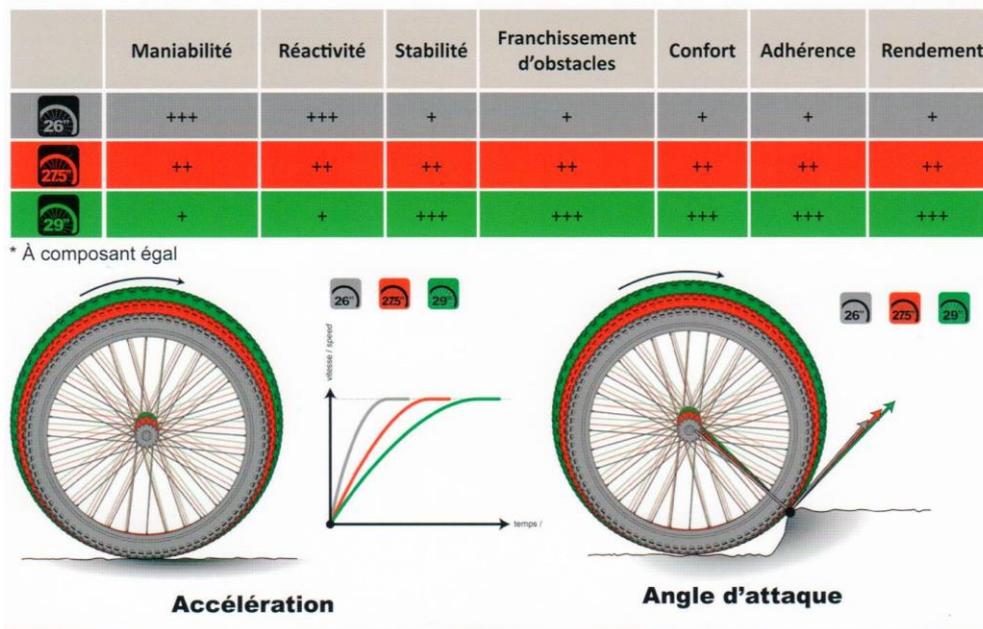


Figure 23. Tableau récapitulatif des avantages des différentes tailles de roues en VTT et comparaison de l'accélération et de l'angle d'attaque de chacun d'entre-eux. (@VéloActif.com)

Les tailles de pneumatiques les plus étudiées dans la littérature sont les 26 pouces et les 29 pouces. Dans son étude, Skals (2013) a montré que le temps moyen de course en cross-country était plus rapide avec des roues de 29". Cependant, seules les phases de descente ont présenté une différence significative, pas dans les autres portions. Les qualités de ces deux modèles ressortent également lors d'un sprint en ligne droite de 60m où il y a une différence en faveur du 26" à mi-distance mais pas sur la ligne d'arrivée. Cela met en valeur les qualités d'accélérations des plus petites roues et l'atout que représente l'inertie des plus grandes une fois lancées. Sur un terrain accidenté, Phillips (2014) a observé une augmentation de la variation de mouvement vertical du cadre induit par l'utilisation des roues de 29', et cela peu importe la vitesse de passage. Une autre étude des plus récentes (Steiner et al., 2016) s'intéressant également aux dimensions des roues mais cette fois-ci avec des athlètes de haut niveau (Equipe Nationale Suisse) a relevé de meilleures performances avec le 29', et cela que ce soit de manière globale sur la course ou sur des sections censées favoriser respectivement le 26 ou le 29. Par contre, bien que des différences aient été trouvées concernant la performance, aucune significativité n'est apparue en analysant la puissance, la cadence ou le rythme cardiaque. Cela pourrait s'expliquer par l'expertise importante des sujets qui auraient la capacité à s'adapter à un matériel différent.

Les types de transmission

La troisième grande avancée concerne les systèmes de transmission des VTTs et l'apparition des mono-plateaux. Le principe est simple, il s'agit d'équiper un seul plateau (généralement de 28 à 34 dents) combiné à une cassette de 10 à 12 pignons. Cela présente deux gros avantages : la légèreté et la simplicité. Premièrement, lorsque l'on n'a qu'un seul plateau on a pas besoin de dérailleur avant ni du système de commande (poignée + câble), et on retire également le poids du (des) plateau(x) supplémentaire(s). Ensuite, cela simplifie grandement la gestion des rapports avec une seule manière d'agir sur le braquet. Cependant, avec cette plage de réglages réduite, il y a une perte de polyvalence et cela peut s'avérer justement un inconvénient si la difficulté d'un parcours a été mal jugée et que l'on a choisi d'équiper le mauvais plateau. A l'heure actuelle, cadre, dimensions et transmission sont les trois grands choix à faire lors de la sélection d'une machine destinée à la pratique du VTT. Toutes ces avancées ne sont toutefois que des possibilités supplémentaires offertes aux coureurs, chaque nouveauté ne devient pas la règle pour autant. Il faut surtout choisir le matériel le plus adapté à chaque coureur afin de lui permettre d'exploiter ses qualités individuelles.

1.3. Synthèse

Au cours de cette introduction, nous avons présenté notre objet d'étude, le VTT XCO, son origine et ses spécificités. Nous avons également détaillé les différents facteurs de performance en cyclisme, et en particulier les domaines biomécaniques, physiologiques et technologiques. Nous avons pu observer que la pratique du VTT XCO était en plein développement et avait subi des évolutions significatives ces dernières années. La modernisation de la discipline l'a fait significativement progresser, notamment au niveau du cadre règlementaire avec une durée de course raccourcie et avec des parcours plus rapides et construits de manière à être plus spectaculaires et attractifs. La technologie a elle aussi progressée et permet désormais aux athlètes de rouler encore plus vite et d'enchaîner les obstacles. La littérature existante concerne peu la version moderne de l'activité (avec une grande partie des recherches datant de plus de 10 ans), ou elle s'attache spécifiquement à certains points techniques (patterns de pédalage), physiques (capacités physiologiques maximales) ou technologiques (systèmes de suspension, tailles de roues). Les récentes évolutions de l'activité nous amènent à penser que sa nature profonde a été affectée et nous sommes convaincus de la nécessité de s'intéresser aux effets de ces changements. Ainsi, de nombreux manques sont à déplorer dans notre connaissance de la discipline actuelle du VTT XCO, ce qui nous encourage à proposer une analyse de la performance dans le but de mieux comprendre la pratique moderne.

Pour ce faire, nous avons choisi d'étudier le système coureur-vélo (homme-machine) par le biais d'une analyse pluridisciplinaire nous permettant d'observer les différents aspects de la performance en VTT XCO susceptible d'avoir récemment évolué. Le haut-niveau représentant la vitrine d'un sport, c'est le secteur qui regroupe les athlètes ayant atteint le plus haut degré de performance dans leur discipline à un instant donné. Comme nous voulions mieux comprendre la pratique moderne du XCO, il nous a semblé pertinent de nous tourner vers les personnes ayant le plus grand niveau d'expertise possible. Observer leurs performances permettant de réaliser un état des lieux de la pratique dans son format actuel et de déterminer ses différentes caractéristiques. Compte tenu des modifications de durée et de topographie des tracés, un regard particulièrement attentif doit être porté à la typologie des efforts, car la demande physiologique tout au long de la course risque d'avoir été affectée.

Comme nous avons pu l'évoquer en début d'introduction, chaque discipline cycliste est unique, autant par son format que par son matériel. Elles requièrent donc toutes de maîtriser une technique particulière et spécifique. S'il y a des changements modifiant la nature de l'activité, ils peuvent aussi avoir eu une influence sur la spécificité de celle-ci. Nous nous sommes donc également intéressés aux conséquences de cette évolution sur le pédalage des athlètes.

Notre projet a donc été de déterminer les facteurs de performance majeurs dans la discipline nouvelle du VTT XCO moderne, et ceci par une approche pluridisciplinaire orientée vers les paramètres biomécaniques, physiologiques et technologiques. Dans un premier temps, nous avons observé un groupe de coureurs de l'équipe nationale Française tout en recueillant un maximum de données biomécaniques et physiologiques afin de tenter de déterminer les caractéristiques actuelles de la discipline. Ensuite nous avons souhaité développer notre recherche spécifiquement sur la dynamique des efforts en situation de compétition. Puis nous avons terminé ce travail par l'étude du pédalage des vététistes avec l'utilisation de leur modèle ordinaire de VTT comparé au pédalage avec un cadre de route.

Nous avons pour hypothèse que la diminution du temps de course entraînerait une accélération du rythme et permettrait aux athlètes d'avoir moins besoin d'endurance et de lisser leurs efforts. Cela entraînerait des phases d'intensité plus élevée se présentant plus rapidement. Une dynamique de course qui s'en trouverait modifiée, tout comme les besoins énergétiques et les facteurs de performance associés. Du côté de la technique, nous imaginons que les paramètres spécifiques de la discipline seraient renforcés ce qui augmenterait les différences par rapport aux autres disciplines, notamment lors de l'utilisation de matériels différents.

2. Caractérisation *in situ* de la pratique du VTT XCO moderne

À la suite du constat d'évolution de la discipline du XCO, notre volonté a été tout d'abord de chercher à comprendre au mieux la pratique dans son format actuel. Nous allons commencer par exposer les raisons qui expliquent le besoin de données *in situ*, puis nous présenterons une étude de paramètres physiologiques en situation de course simulée. Celle-ci a été réalisée avec des athlètes de haut-niveau, qui incarnent selon nous le mieux la performance.



Figure 24. Photographie d'un athlète de l'équipe de France de VTT en expérimentation sur le site de la Coupe de France de XCO 2015 à Luminy (Marseille) (@CyrilBussat)

2.1. La nécessité de mesures de terrain

Comme nous avons pu le voir précédemment, le cyclisme est une pratique sportive historique. Ainsi, un grand nombre d'études scientifiques ont été menées sur le sujet au cours du temps. Si l'on se penche sur la discipline particulière du Cross-Country, les expérimentations qui s'y rapportent spécifiquement sont bien plus rares et récentes. Nous nous proposons de détailler les principales découvertes sur le VTT afin de mettre en valeur les besoins actuels de la recherche. Deux grandes orientations se dégagent de la littérature.

La spécificité des athlètes de XCO

Une première partie des recherches s'est intéressée à la spécificité des coureurs cyclistes pratiquants le XCO en portant un regard attentif aux différences avec certaines autres disciplines cyclistes. Tout d'abord des études (Novak & Dascombe, 2014) ont été menées pour comparer les capacités physiologiques des cyclistes en les différenciant selon leur disciplines (Route, BMX, XC, DH). Ces expérimentations mettent en avant le fait que les pratiquants en route et en cross-country ont des capacités anaérobiques et une VO₂max plus élevées (65.3 - 69.6 vs. 52.4 - 55.3 mL.kg⁻¹.min⁻¹) que ceux de descente et de BMX. Par contre, ceux-ci possèdent une plus grande capacité de pic de puissance sur les efforts courts. Des particularités ont aussi été relevées concernant la posture des cyclistes selon leur pratique. En position de pédalage, une plus grande flexion lombaire a été trouvée chez les routiers mais avec une colonne dorsale plus fléchie. Grâce à un test d'extension volontaire du genou (Muyor & Zabala, 2016), il a également été mis en valeur une plus grande extensibilité des muscles ischio-jambiers chez les routiers ($87.22^\circ \pm 10.20^\circ$) que chez les vététistes ($81.46^\circ \pm 9.22^\circ$).

D'un point de vue plus biomécanique, l'influence du type de pratique a également été étudiée au niveau des vibrations induites par le terrain. Les recherches de Macdermid *et al.* (2015) ont montré que sur une piste de mêmes caractéristiques (distance, gradient), la différence de surface entraîne significativement plus de vibrations au niveau du vélo et des points de contact entre le coureur et celui-ci lorsqu'il est en tout-terrain. Une activité d'équilibrage est nécessaire pour aider à stabiliser la position du coureur sur son vélo, et cela crée donc un travail supplémentaire non-propulsif qui augmente les besoins énergétiques pour le compenser (figure 20).

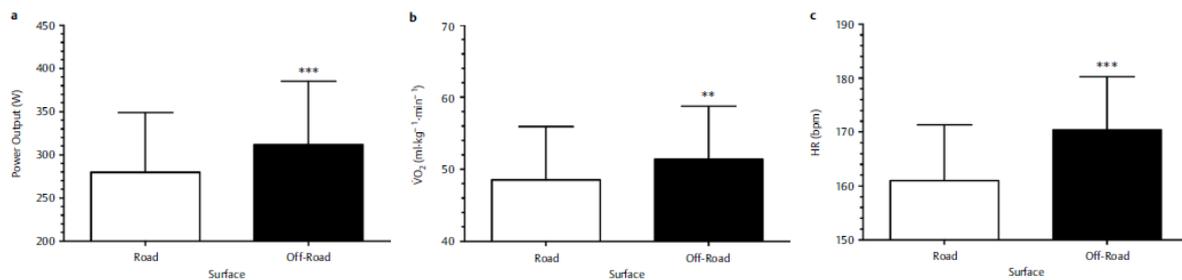


Figure 25. Moyenne et écart type de a : la puissance développée (W), b : la consommation d'oxygène ($\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$), et c : la fréquence cardiaque (bpm) pour deux tracés de surface différentes : route (blanc) vs hors-piste (noir) (d'après Macdermid, 2015)

D'autres études ont été conduites au sein même de la pratique tout-terrain, Hurst (2012) a comparé le DH et le XCO et il a montré que l'activité musculaire du haut du corps était différente en descente selon la spécialité sportive, notamment au niveau du triceps brachial qui a une action plus importante en XCO. Cela peut s'expliquer par deux paramètres : dans un souci écologique la comparaison n'a pas été réalisée sur le même terrain, mais surtout les vélos de DH possèdent des fourches avec un système de débattement d'environ 100 millimètres supplémentaires par rapport à ceux de XCO. Il a poursuivi ses investigations l'année d'après en montrant qu'il y avait un impact du type de terrain (naturel ou artificiel) sur les paramètres de vitesse et d'accélération en DH, mais pas sur le rythme cardiaque (Hurst et al., 2013). La comparaison avec les autres disciplines permet ainsi de distinguer une partie des paramètres spécifiques de la discipline du XCO.

Les déterminants de la performance en XCO

La seconde partie des études existantes s'est penchée uniquement sur la pratique du XCO et vers les déterminants de la performance. L'analyse la plus complète et la plus récente de l'activité cherchant précisément à caractériser la discipline se trouve être celle d'Impellizzeri et Marcora (2007). Cette description de la physiologie en VTT rassemble les recherches portées sur la pratique en elle-même, les qualités requises et le profil physiologique des pratiquants. On y retrouve certains aspects évoqués précédemment comme la comparaison du poids de corps et des données issues d'un test d'effort incrémental entre les vététistes et différents spécialistes de cyclisme sur route (figure 25).

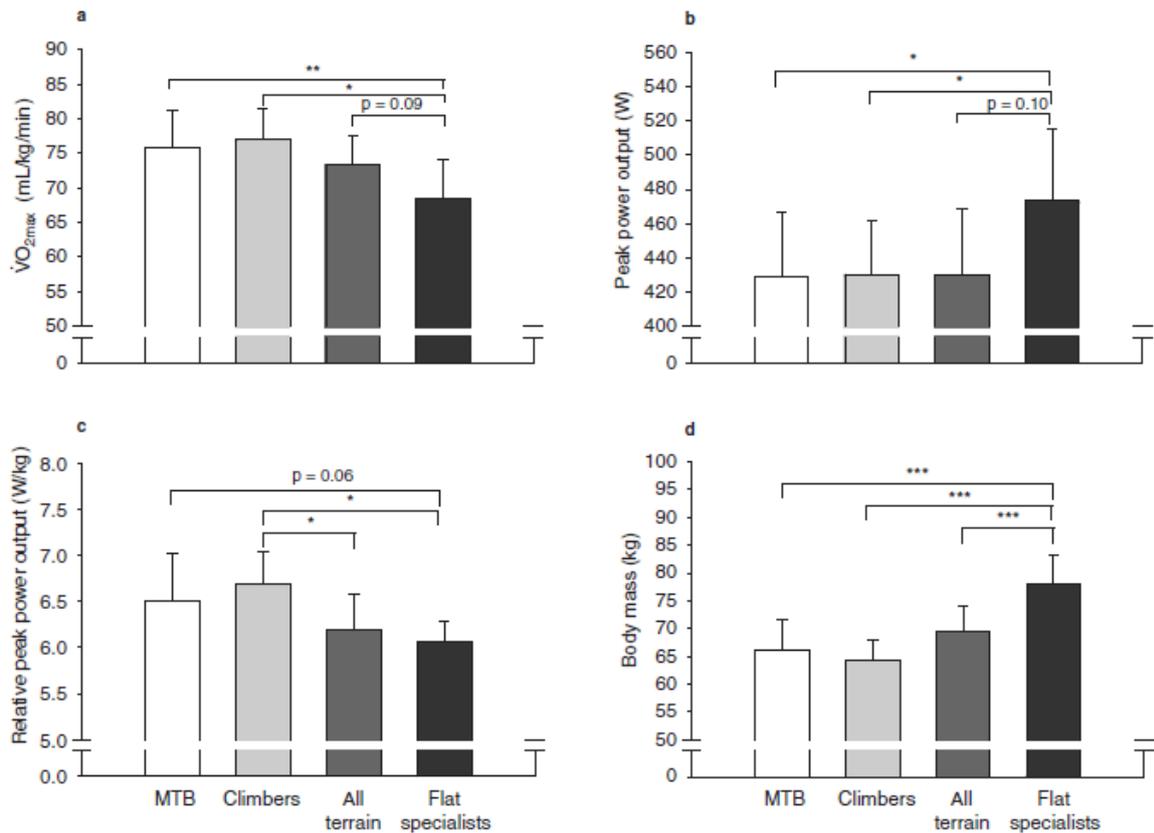


Figure 26. Comparaisons des caractéristiques issues d'un test d'effort entre des vététistes (MTB, n=15) et des routiers : grimpeurs (climbers, n=9), polyvalents (all-terrain, n = 15) et rouleurs (flat specialists, n=10). (* p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001) (d'après Impellizzeri et Marcora, 2007)

Ces conclusions montrent que le cross-country est une pratique sollicitant un haut niveau d'endurance. Les puissances et capacités aérobies des vététistes sont élevées tout comme celles des routiers et leur ratio poids/puissance est proche des grimpeurs. Cependant les caractéristiques des courses de XCO (plus courtes et plus intenses) entrent en jeu et doivent être prise en compte dans l'entraînement qui ne peut être semblable à celui des cyclistes sur route. Cette étude met en avant des manques subsistants dans notre compréhension de la discipline et elle encourage à mener des investigations supplémentaires concernant l'économie de course, les stratégies nutritionnelles, mais surtout l'impact des capacités et de la puissance anaérobie. C'est donc l'orientation que nous avons choisi de donner à cette première partie.

Pour continuer dans l'exploration de la littérature existante, nous pouvons nous intéresser aux nombreuses études qui se sont orientées vers l'établissement de facteurs permettant de prédire la performance en VTT. Certaines (Impellizzeri et al., 2005) ont mis en avant le principe

selon lequel ce ne sont pas toujours les capacités maximales qui déterminent la performance future. Les indices sous maximaux de la capacité aérobie tels que la puissance, la VO₂ et le second seuil ventilatoire sont des déterminants plus importants de la performance en VTT que le pic de puissance et la VO₂max. Toutefois, Impellizzeri nous rappelle qu'une corrélation significative n'implique pas de causalité, et que d'autres facteurs physiologiques et techniques devraient être explorés. En accord avec Baron (2001), il préconise d'évaluer de manière systématique les capacités anaérobies des cyclistes, car les courses de VTT sont des exercices avec des phases de très haute intensité, notamment lors des montées raides où les pics de puissance développée peuvent aller de 250W à 800W (Stapelheld et al., 2004).

D'autres recherches (Gregory et al., 2007; Costa & Fernando, 2008) montrent qu'il est plus pertinent de travailler avec des valeurs relatives plutôt qu'absolues car elles sont plus corrélées à la performance. Par exemple, certaines valeurs devraient être normalisées par rapport à la masse de l'athlète. On trouve ainsi une meilleure corrélation entre la performance et le pic de puissance normalisé en fonction du poids ou encore entre la performance et le niveau de puissance au second seuil lactique relatif au poids plutôt qu'en valeur maximale absolue.

	Outdoor competition time (min:s)	P-value	Outdoor time trial time (min:s)	P-value
PPO (W)	$r = -0.65$ (-0.93 to 0.10)	N.S.	$r = -0.66$ (-0.93 to 0.08)	N.S.
PPO (W · kg ⁻¹)	$r = -0.83$ (-0.97 to -0.30)	< 0.05	$r = -0.83$ (-0.97 to -0.30)	< 0.05
PO at OBLA (W)	$r = -0.56$ (-0.91 to 0.24)	N.S.	$r = -0.67$ (-0.93 to 0.07)	N.S.
PO at OBLA (W · kg ⁻¹)	$r = -0.64$ (-0.93 to 0.12)	N.S.	$r = -0.74$ (-0.95 to -0.07)	< 0.05

Note: PPO = peak power output; OBLA = onset of blood lactate accumulation; PO at OBLA = power output at a blood lactate concentration of 4 mmol · l⁻¹; N.S. = non-significant.

Tableau 1. Représentation des corrélations (r de Pearson) entre la performance et différentes variables de puissance mesurées en laboratoire (intervalle de confiance de 95% entre parenthèses et P pour la significativité) (d'après Gregory et al, 2007)

En effet, la performance lors de courses en extérieur a été corrélée avec la VO₂ au seuil lactique déterminé par un test incrémental jusqu'à épuisement, et avec la moyenne absolue de VO₂ durant un test de performance de course simulée en intérieur d'une heure, mais pas avec la VO₂ moyenne exprimée relativement au poids de corps. Cependant, la pratique du cross-country diffère significativement du cyclisme sur route et il a été montré que le meilleur prédicteur était la puissance moyenne produite lors d'un test de Wingate exprimée

relativement au poids de corps (Davison et al., 2000). Ces résultats contrastés suggèrent que les exigences pour performer en vélo sur terrain plat ou vallonné sont complètement différents.

Dans son analyse, Baron (2001) s'est attaché à décrire les caractéristiques de la puissance aérobie et anaérobie des vététistes. Il a observé que la capacité de générer un haut niveau de puissance sur un sprint de 10 secondes est plus importante chez les vététistes confirmés ($14.9 \pm 1.1 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$) par rapport à un groupe contrôle de non spécialistes ($13.3 \pm 1.4 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$). Cette capacité prend toute son importance en XCO dans le cadre de certaines phases courtes et intenses particulières telles que le départ en « mass-start », les montées raides et les dépassements.

Par la suite, Stapelfeld (2004) définit les courses de vélo tout terrain comme étant caractérisées par une grande variabilité en puissance mais avec une fréquence cardiaque relativement stable tout au long de l'effort malgré une haute intensité. Il déclare lui aussi qu'un système à la fois aérobie et anaérobie hautement développé est nécessaire pour répondre aux grandes variations de rythme d'un parcours. Cette étude datant d'une dizaine d'années et donc d'avant les grandes modifications organisationnelles du XCO, l'évolution de la dynamique de l'effort a potentiellement amplifié ces changements de rythme. Au cours de ces recherches, il a également été montré que les tests en laboratoire de prédiction de performance utilisés pour les routiers ne sont probablement pas adaptés aux coureurs de VTT et que des recherches supplémentaires étaient nécessaires pour concevoir des évaluations adaptées aux spécificités du XC (Prins et al., 2007). Ces recherches sont intéressantes car elles décrivent une grande partie des mécanismes mis en jeu dans la pratique. Cependant ces études datent d'avant la période des changements importants dans la nature de l'activité que nous avons pu mettre en évidence, et notamment à partir de 2013 et de l'établissement des nouvelles règles de l'UCI sur le temps de course (« Règlementation UCI 2018 », s. d.). Et au vu des nombreuses évolutions que nous avons pu relever, il paraît nécessaire de recueillir des données de terrain dans les conditions actuelles.

L'approche du format moderne

Les premières informations concernant la pratique moderne du XC proviennent de l'expérimentation menée par Macdermid et Stannard (2012). Ils montrent qu'il existe une influence du terrain sur la puissance produite, la cadence, la VO₂ et la contribution anaérobie mais pas sur la fréquence cardiaque, ni sur la capacité aérobie. Ils présentent notamment la manière dont les variables physiologiques et les variables de travail sont distribuées durant un test de terrain (figure 27).

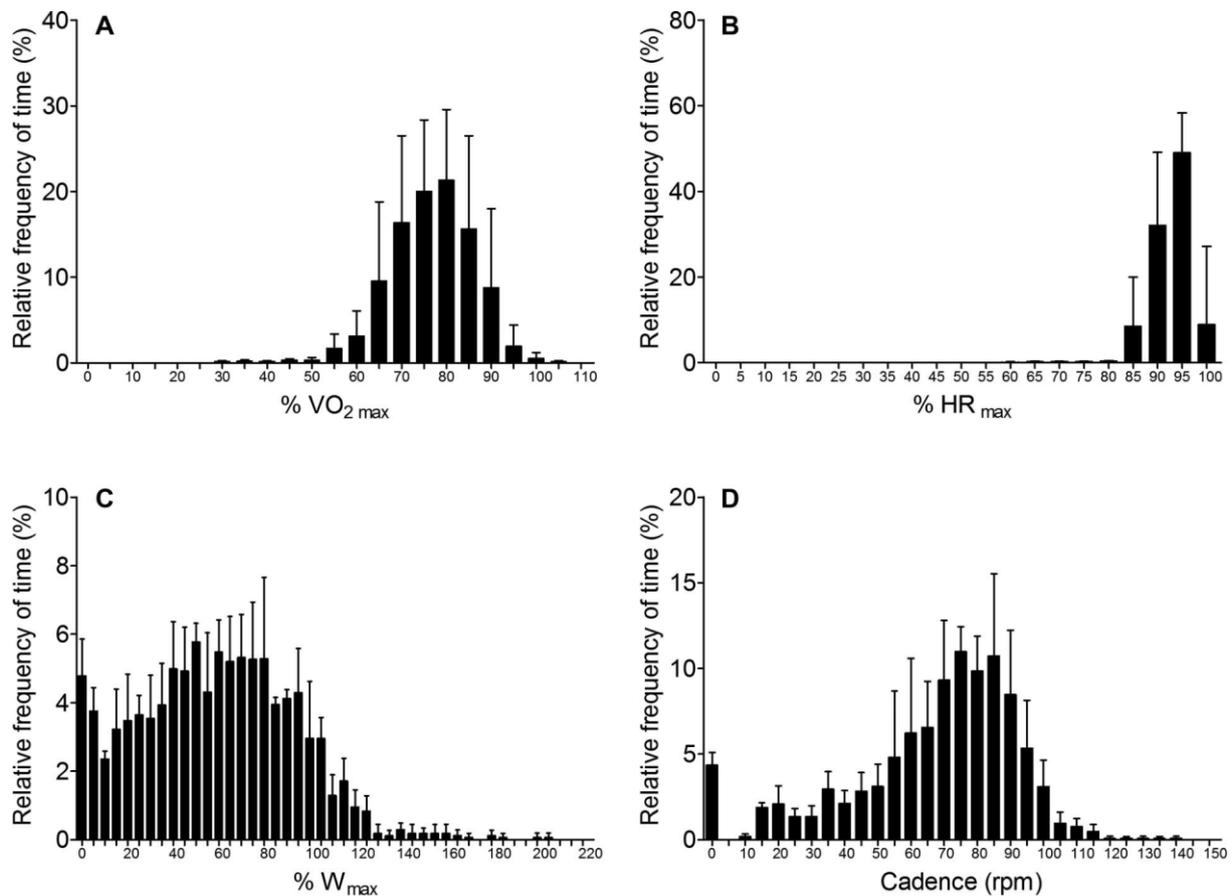


Figure 27. Répartition temporelle de A : la consommation d'oxygène, B : la fréquence cardiaque, C : la puissance développée, D : la cadence de pédalage (d'après Macdermid et Stannard, 2012)

Ces données soulignent la dissociation des variations entre la puissance développée et les mesures physiologiques de fréquence cardiaque et de consommation d'oxygène. Cela est particulièrement intéressant quand on sait que la préparation et le suivi de performance des cyclistes se fait majoritairement par l'intermédiaire de mesures de l'intensité de l'exercice.

Des cardiofréquence-mètres ou des capteurs de puissance sont utilisés pour évaluer indirectement le niveau d'effort, tandis que du matériel de laboratoire tels que les analyseurs d'échanges gazeux sont nécessaires à une évaluation plus directe de la consommation énergétique. L'observation du rythme cardiaque est la technique la plus facile car elle ne nécessite que peu de moyen, mais il s'agit de la valeur la plus complexe à interpréter car elle est sujette à l'influence de nombreux facteurs externes (température, stress, hydratation, ...). De plus, la réponse cardiaque à l'effort a un temps de latence. Pour finir on peut constater sur les données présentées en figures 27 et 28 qu'au cours d'un exercice de haute intensité prolongé la fréquence cardiaque reste élevée (85 à 100 % FC_{max}) et varie peu. Pour étudier la dynamique des efforts, il semble donc plus pertinent de s'intéresser aux valeurs de puissance et de consommation d'oxygène qui fluctuent bien plus.

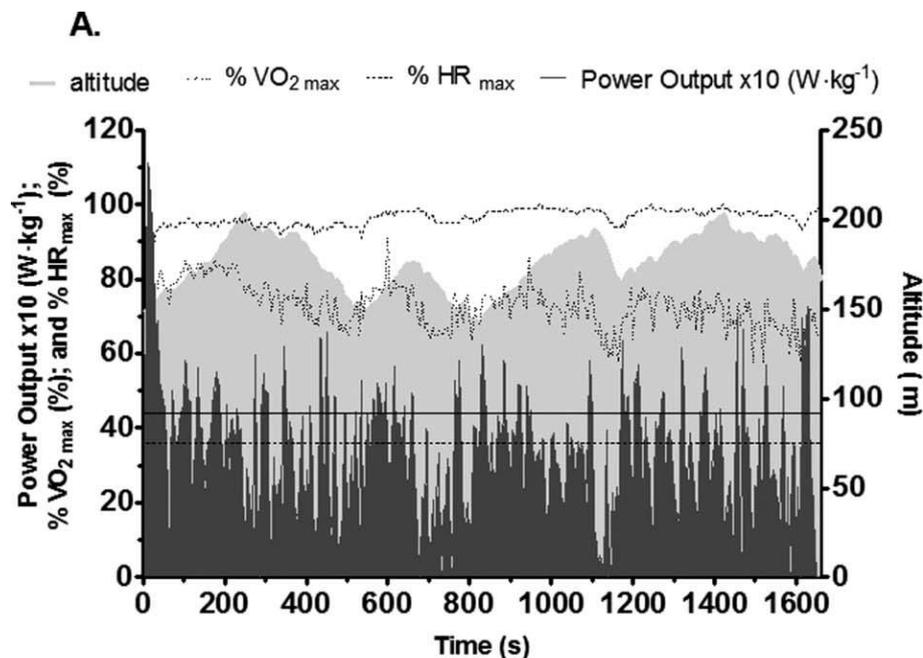


Figure 28. Evolution des données de consommation d'oxygène, de fréquence cardiaque et de puissance développée d'un athlète (*d'après Macdermid et Stannard, 2012*)

Le suivi de la consommation d'oxygène paraît être la technique la plus précise, car elle permet d'avoir un aperçu direct de l'état physiologique de l'athlète. Cependant elle est soumise à l'utilisation de matériel extrêmement coûteux et peut amener une légère gêne au coureur (ou tout du moins le perturber). La solution intermédiaire semble donc être l'utilisation d'un capteur de puissance (généralement sous la forme d'un pédalier

instrumenté) qui va permettre l'acquisition des données de production motrice de l'athlète. Cependant, par définition la puissance est liée à la force et à la cadence de pédalage, ce qui signifie que ce type d'outil n'enregistre pas de données lors des phases de non-pédalage.

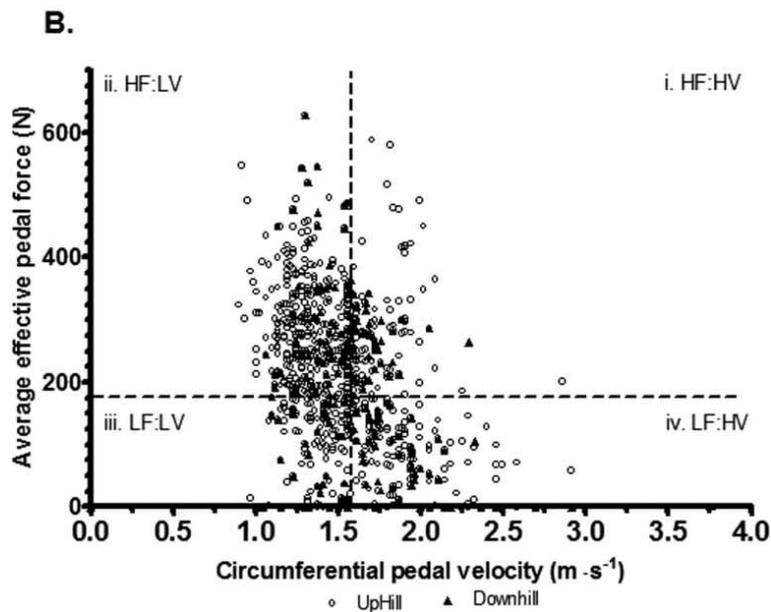


Figure 29. Relation entre la force effective moyenne et la vitesse de rotation des pédales d'un athlète (d'après Macdermid et Stannard, 2012)

En s'intéressant aux données de force et de cadence d'un coureur et de leurs variations tout au long de la course, on peut remarquer que la discipline du XCO présente une prédominance de phases de faible vitesse et de grande force (figure 29). Il est également mis en évidence que la pratique présente le besoin d'une grande capacité aérobie mais les mouvements clefs (départ, relance, dépassement) sont marqués par une forte demande anaérobie.

De plus, des études plus récentes (Inoue et al., 2012; Miller & Macdermid, 2015) ont mis en évidence que le cross-country était un sport d'endurance où la puissance anaérobie a aussi son importance. Une corrélation a été découverte entre le temps de course et les puissances maximale et moyenne enregistrées lors d'une session de répétition de sprints en laboratoire. La puissance moyenne sur les 30 dernières secondes d'un test maximal de 3 minutes à résistance fixe s'est également révélée être une valeur permettant de prédire la performance en XC avec plus de précision que le seuil anaérobie. Toutefois, lors de ce type de tests en laboratoire, l'utilisation obligatoire d'ergocycle ne permet pas de recréer les conditions

écologiques de pratique, et des différences significatives ont même pu être démontrées (Mieras et al., 2014). Une intensité plus élevée a été relevée, pour un même niveau d'effort perçu et des conditions environnementales identiques, en condition de terrain par rapport au pédalage sur ergocycle en laboratoire. Nous pouvons faire un parallèle avec la course à pied car c'est une problématique qui est également rencontrée avec l'utilisation des tapis de course en laboratoire et qui demande parfois des ajustements (Panasci et al., 2017). Le terrain a donc lui aussi son importance et les conditions dans lesquelles se déroulent les activités sportives, que ce soit la topographie, la météorologie ou encore la nature de la surface (Paul William Macdermid et al., 2015).

La situation actuelle

En résumé, l'ensemble des travaux scientifiques effectués à ce jour a mis en évidence la spécificité de la pratique du VTT, et en particulier la discipline du XCO. Elle se distingue nettement du cyclisme sur route étant donné la nature du terrain impliquant une gestion adaptée des perturbations liées. Elle se distingue également de la descente (DH) par la variabilité des situations proposées. Les changements récents dans l'activité semblent avoir éloigné le VTT XCO de l'endurance simple pour l'emmener plutôt vers une pratique constituée d'efforts discontinus plus intenses. Cependant les tests d'évaluation de laboratoire n'ont pas encore pris cette dimension en compte dans l'élaboration des protocoles d'étude de la performance. Un certain nombre de paramètres absolus et relatifs ont pu être observés lors de tests d'effort, dans le but de prédire la réussite future lors d'expérimentations de terrain ou lors de compétitions. Mais aucune évaluation n'a été spécifiquement développée pour l'analyse de la performance en XCO. Cela nous conforte dans notre volonté de décrire les caractéristiques de l'activité moderne dans le but de la comprendre au mieux et de dégager des pistes de recherche pour adapter ces tests. Le développement du matériel a également fortement intéressé les chercheurs qui ont pu mettre en évidence les avantages de certains dispositifs ou choix technologiques. Toutefois, le fait qu'aucun modèle n'ait été systématiquement défini comme idéal et le fait qu'à haut niveau on continue de trouver plusieurs types différents de technologies selon les coureurs montrent que les paramètres du vélo sont à adapter à l'athlète qui l'utilise afin d'optimiser la relation homme-machine pour optimiser la performance. De plus, malgré l'établissement d'un certain nombre d'observations

pertinentes au sujet des facteurs d'influence de la pratique du VTT XCO, la majorité d'entre elles ont été établies précédemment aux forts changements constatés dans la nature de l'activité. Après avoir mis en évidence ces manques, il nous paraît important de tenter de compléter les connaissances concernant la pratique du XCO « moderne ». Pour cela nous proposons de poursuivre l'analyse de la performance en travaillant avec des athlètes de très haut-niveau.

2.2. Expérimentation avec le haut-niveau

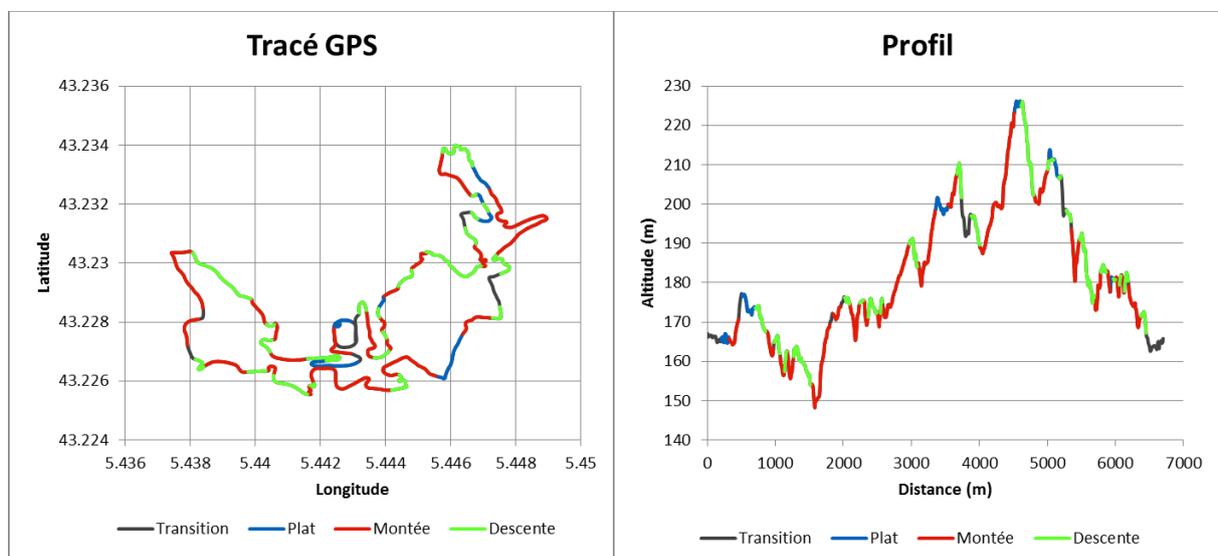
Nous avons mis en valeur le besoin de réaliser des mesures de terrain afin de déterminer les caractéristiques de la discipline du Cross-Country moderne. Nous avons donc mis en place une étude *in-situ* dans le but de mieux comprendre les mécanismes biomécaniques et physiologiques de l'athlète et sa manière de gérer les divers aspects de cette nouvelle discipline. Notre démarche générale étant orientée vers la performance, il nous est apparu naturel de nous tourner vers les athlètes de haut-niveau. L'opportunité s'est alors présentée de pouvoir travailler en partenariat avec la Fédération Française de Cyclisme (FFC), et surtout avec certains coureurs faisant partie des meilleurs de leur discipline.



Figure 30. Photographie des athlètes Victor Koretsky (à gauche) et Hugo Drechou (à droite) lors de la Coupe de France de XCO 2015 à Luminy (Marseille) (©BrunoDonnangricchia)

2.2.1. Matériel et méthode

Cette étude a consisté à acquérir un grand nombre de paramètres, à la fois biomécaniques et physiologiques, sur des coureurs de haut-niveau dans des conditions les plus proches possibles de la compétition. Pour cela, nous avons mis en place des sessions de recueil de données sur le circuit officiel de la première manche de Coupe de France de VTT, qui s'est déroulée à Marseille sur le Campus Universitaire de Luminy entre le 27 et le 29 Mars 2015. C'est un tracé dont la distance totale est de 6.05 kilomètres avec un dénivelé positif de 200 m. Pour plus de précision, nous avons effectué un repérage topographique. Ce dernier a été réalisé grâce aux données d'altitude du GPS nous permettant de réaliser un suivi de l'évolution de la pente tout au long du circuit. Nous avons ainsi établi différentes zones (montée, descente ou plat) suivant leur dénivelé (positif, négatif ou nul). Cependant certaines sections étant particulièrement variables en terme d'altitude sur une courte période, elles ne se rangent dans aucune catégorie. Nous avons proposé de les désigner comme étant des zones de transition (figure 31).



Notre panel de sujets était constitué de 6 coureurs faisant partie de l'équipe de France de VTT Cross-Country Olympique (Age : 25.2 ± 3.4 ans, Taille : 173.3 ± 10.6 cm , Masse : 61.2 ± 8.0 kg). Ils ont tous eu l'occasion de repérer le tracé comme avant toute compétition afin d'éviter les biais qui pourraient être induits par la découverte du circuit. Il a été demandé à chacun

d'entre eux de réaliser un seul tour sur le parcours avec pour consigne particulière d'avoir la même intensité que s'il s'agissait d'un premier tour de compétition.

Les participants et leurs vélos ont été équipés avec différents appareils de mesures. Premièrement, un analyseur d'échange gazeux portable (K4 b2, Cosmed Srl, Rome, Italie) a été installé grâce à un harnais et les coureurs devaient porter un masque récoltant les gaz d'expiration. Cet outil va nous renseigner entre autre sur l'évolution de la consommation d'oxygène, et il va également recueillir le rythme cardiaque provenant du cardiofréquencemètre porté par les athlètes. L'ensemble va nous donner une idée du rendement énergétique tout au long du parcours. Nous porterons une attention toute particulière sur la répartition de la dépense énergétique en fonction des zones d'intensité physiologiques. Pour cela, chaque sujet a réalisé un protocole d'effort incrémental dans les jours précédant l'expérimentation afin de déterminer leur VO₂max ainsi que leurs seuils métaboliques. Un test supplémentaire leur a été demandé afin de connaître leur vitesse de pédalage optimale (VO_{Opt}). Nous avons suivi la méthode présentée dans l'étude de Dorel (2003). Il s'agit pour l'athlète de réaliser trois sprints de 6 secondes dans des conditions de résistance différentes afin de le faire travailler en force, en puissance et en vitesse. La force et la puissance sont constamment monitorées lors de ces exercices et combinées à la cadence de pédalage, ces données permettent d'établir les relations force-vitesse et puissance-vitesse du sujet.



Figure 32. Photographies présentant un athlète et sa machine avec l'équipement au complet quelques instants avant le début de l'expérimentation

Nous nous sommes également intéressés à l'action motrice des jambes et donc à l'activité musculaire des membres inférieurs. Nous avons utilisé des capteurs électromyographiques (Trigno, Delsys Inc., USA) sans fils et connectés à un boîtier d'acquisition que nous avons placé dans la poche arrière de la tenue du coureur. Les électrodes, au nombre de 14 (7 par jambe), ont été placées sur une sélection de muscles de surface parmi ceux impliqués dans le geste de pédalage. Les muscles désignés sont : le Biceps Femoris, le Gluteus Maximus, le Rectus Femoris, le Vastus Medialis, le Gastrocnemius Lateralis, le Soleus et le Tibialis Anterior (BF, RF, VM, GL, SO et TA). Le vélo a lui aussi été instrumenté avec l'utilisation d'un inclinomètre (Captiv, Groupe TEA, France) pour déterminer les oscillations latérales et un accéléromètre 3D placés sur le cintre permettant de monitorer les vibrations arrivants au niveau du guidon. Un second boîtier d'acquisition, placé lui aussi dans la poche arrière du cycliste, était pourvu d'un système de positionnement par satellite (Edge 520, Garmin Ltd, USA) permettant d'enregistrer l'évolution de sa position géographique et de son altitude. Ce dernier capteur récoltait aussi la cadence de pédalage grâce à un dispositif installé sur le pédalier. L'ensemble de ces mesures a pu être synchronisé grâce à l'utilisation d'un signal analogique de référence enregistré simultanément par tous les boîtiers d'acquisition.



Figure 33. Illustrations du type d'obstacles franchis durant l'expérimentation (@CyrilBussat)

Dans un premier temps l'intégralité de l'expérimentation est expliquée au sujet et les consignes concernant le niveau d'implication sont passées. Ensuite une première phase d'équipement a lieu avec l'installation de la majorité des systèmes de mesure. On place les électrodes EMG et le cardiofréquencemètre, on dispose les capteurs d'inclinaison et de vibration ainsi que le compte-tours sur le vélo. Avant de prendre le départ du tour de circuit, une phase d'échauffement standardisée va se dérouler en deux parties. La première, au sein des installations du laboratoire va s'effectuer sur un ergocycle (Cyclus2, RBM Elektronik, Leipzig, Allemagne). L'intensité de l'effort va être contrôlée par le niveau de puissance imposé qui est lui-même normalisé par rapport aux capacités maximales de chacun. Une première phase constante à 30% de PMA dure 7 minutes puis suivent 3 montées de 30 secondes à 100% de PMA entrecoupées de 1 minute de récupération. Une fois la séquence terminée, le sujet était invité à terminer son échauffement en empruntant une portion du parcours d'environ 10 minutes à allure de confort pour rejoindre la ligne de départ (figure 34). La deuxième partie de l'équipement peut alors avoir lieu avec la mise en place de l'analyseur de gaz respiratoires et de son masque et l'initialisation de l'acquisition de l'ensemble des capteurs avant de pouvoir lancer le sujet pour son tour du circuit.

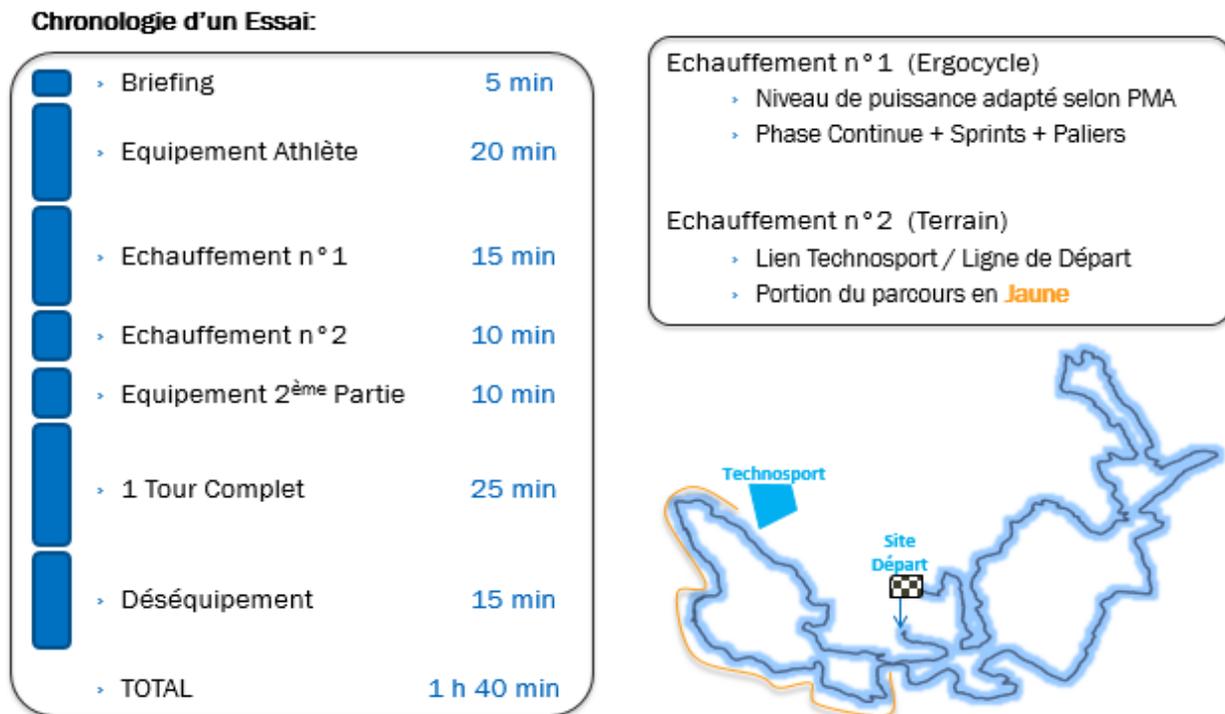


Figure 34. Chronologie d'un essai et localisation des points de repères

2.2.2. Traitement des données

Grâce à l'horloge interne du système Garmin nous avons extrait les temps d'entrée et de sortie de chaque portion repérée lors de l'analyse topographique présentée un peu plus tôt, afin de déterminer le temps passé dans chaque zone. Ce système nous a également permis d'avoir accès à la fréquence de pédalage durant l'ensemble de la course. Nous avons exprimé cette cadence en fonction de la cadence optimale mécanique (VO_{pt}). Pour rappel, cette vitesse est considérée comme mécaniquement optimale car c'est celle qui permet de développer un maximum de puissance. Elle a été établie pour chaque athlète lors d'un test précédent de détermination de la relation force/vitesse. Chaque zone est définie comme une fenêtre de +/- 5 % autour d'une valeur palier, de 40 à 110 % de VO_{pt} . Les valeurs mesurées en dessous de 40 rpm étaient identifiées comme des mouvements parasites et assimilées à du non-pédalage. Les données d'angulation recueillies avec le système Captiv n'ont pas subi de traitement particulier. Les vibrations transmises par le cadre du vélo qui auraient pu perturber les valeurs d'inclinaison mesurées n'ont pas induit de bruit pouvant gêner la mesure.

La consommation d'oxygène (VO₂) qui a été mesurée par l'analyseur de gaz a été normalisée par rapport au poids de corps (VO₂kg) pour pouvoir comparer les différents athlètes. Suite à l'acquisition par l'analyseur portable des données sur les échanges gazeux, nous avons séparé les phases d'intensités différentes. Pour cela nous avons pris comme référence la valeur de VO_{2max} de chaque athlète et nous avons réparti les différentes périodes selon la difficulté de l'effort. La durée des efforts d'intensité similaire a été cumulée et normalisée selon le temps total de course. Toujours dans le but de caractériser la typologie de l'effort, nous avons également déterminé la répartition du temps d'activité en prenant pour référence les seuils ventilatoires (SV1 et SV2). Concernant le traitement des signaux EMGs, nous avons procédé classiquement par un premier filtrage des données avec un premier filtre passe bande (10-450 Hz) de manière à supprimer les fréquences pouvant venir bruite le signal. Puis nous avons redressé les données (valeurs absolues) et appliqué un second filtre passe-bas (4 Hz) de manière à obtenir une enveloppe linéaire du signal. Nous avons normalisé les valeurs en fonction du maximum enregistré parmi tous les muscles au cours de chacun des essais.

2.2.3. Résultats

La segmentation nous a permis de détailler la répartition du temps passé selon la topographie. Il a fallu en moyenne 1130 secondes à nos sujets pour réaliser un tour du circuit, soit près de 19 minutes. (Minimum : 16min18sec ; Maximum : 21min58sec)

Temps	Montée	Plat	Descente	Transition	Total
Relatif (%)	49 %	11 %	31 %	9 %	100 %
Absolu (sec)	554	124	350	102	1130 sec

Tableau 2. Répartition de la moyenne du temps passé dans chaque zone topographique

Mis à part les données de positionnement provenant du GPS Garmin, deux autres dispositifs ont recueilli des informations. Tout d'abord le compte-tours installé sur le cadre des sujets nous a permis de monitorer la cadence de pédalage tout au long du parcours. Nous pouvons voir en figure 35 un histogramme présentant la distribution du temps passé dans des zones de cadences étudiées, relatives à un pourcentage de la VOpt.

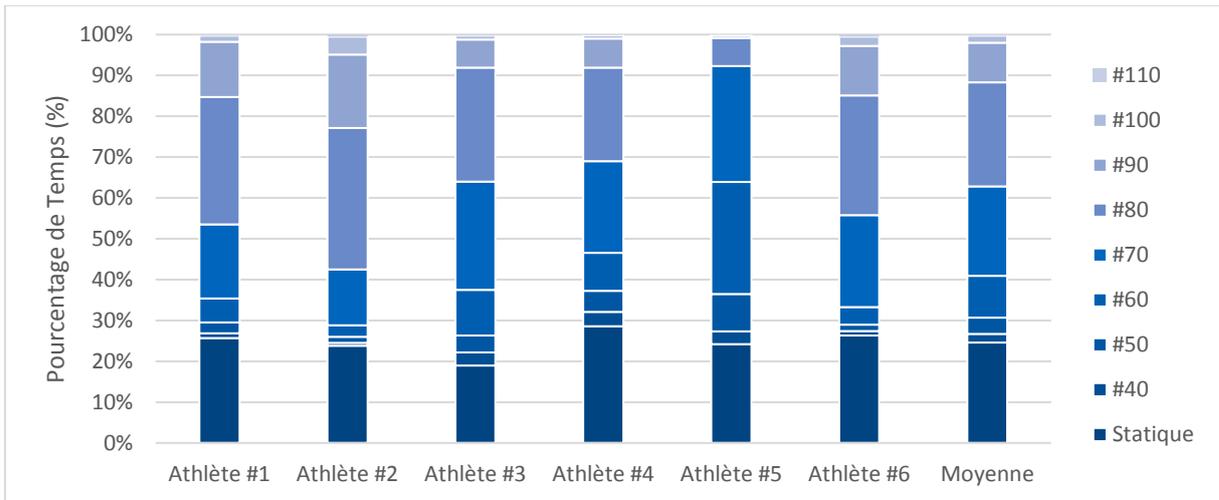


Figure 35. Répartition de la cadence pour les 6 sujets

En ce qui concerne l'inclinomètre positionné sur le cadre du vélo, nous avons particulièrement porté notre attention sur les oscillations latérales. Nous les avons observées lors des multiples phases de la course (montée, descente, passage technique, non-pédalage...) afin de rechercher des comportements remarquables pouvant être liés à ces instants particuliers. Nous n'avons pas pu déterminer de patterns systématiques identifiables mais cependant une certaine régularité de la variation d'angulation semble s'installer dans les instants de relance (pédalage de forte intensité suivant une période statique) (figure 36).

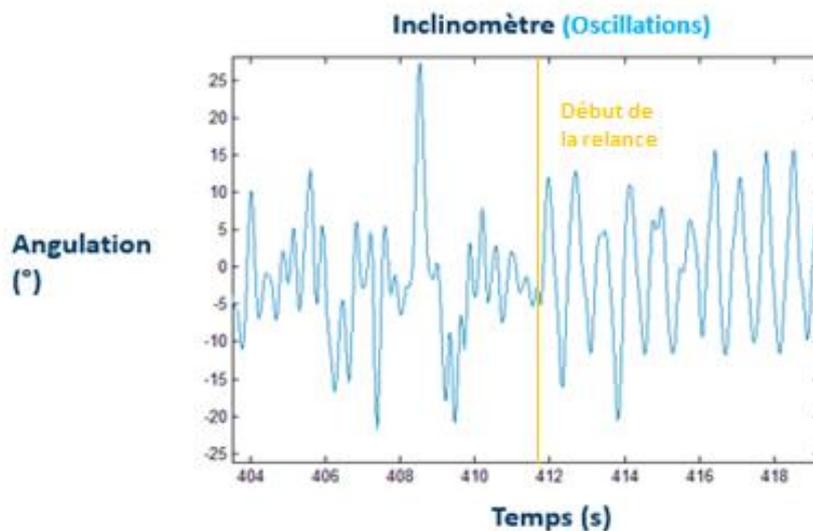


Figure 36. Représentation des oscillations latérales en phase de relance

Pour ce qui est des mesures physiologiques, nous pouvons commencer par nous intéresser à la dépense énergétique des sujets, représentée par la courbe d'évolution de la consommation d'oxygène, qui a été normalisée selon la masse des athlètes et ramenée à leur capacité maximale (figure 37).

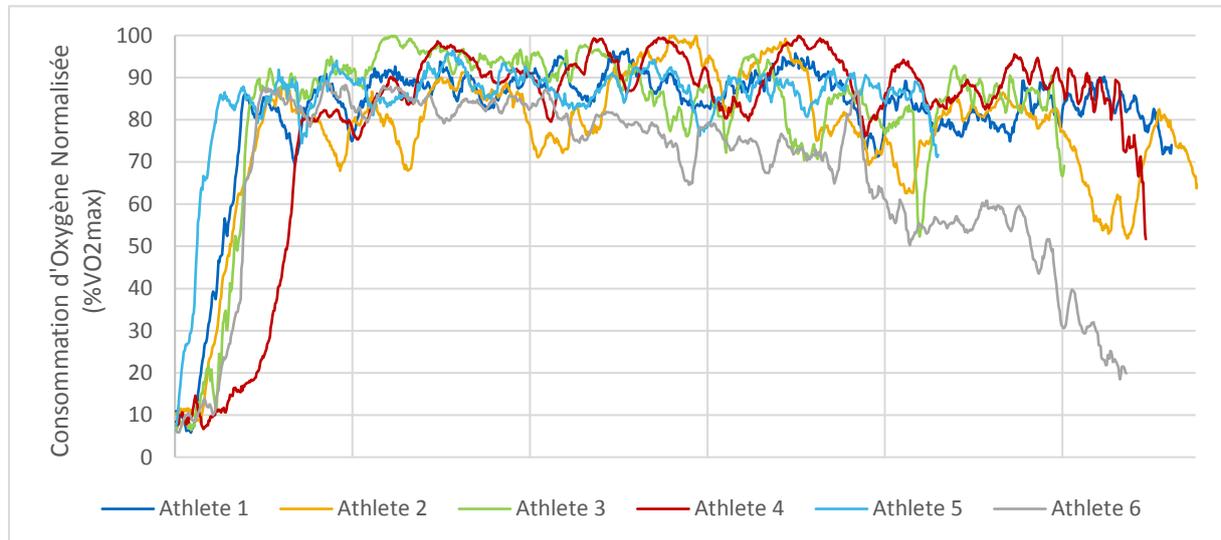


Figure 37. Représentation de la VO2kg au cours de la course normalisée selon la VO2_{max} pour chacun des 6 athlètes

Nous constatons alors que les athlètes atteignent rapidement un haut niveau de consommation d'oxygène, puis qu'ils varient majoritairement entre 70 et 100% de leur capacité maximale. Nous pouvons toutefois noter qu'il y a eu manifestement un problème d'acquisition en fin de parcours pour le sujet 6 (probablement lié au masque), et que ses données physiologiques n'ont pas correctement été prises en compte par la suite. Pour détailler les zones de travail, nous avons observé le temps passé à chaque niveau d'intensité (figure 38), ce qui nous montre que plus de trois quarts du temps (79.4%) a été passé au-delà des 70% de VO2_{max}.

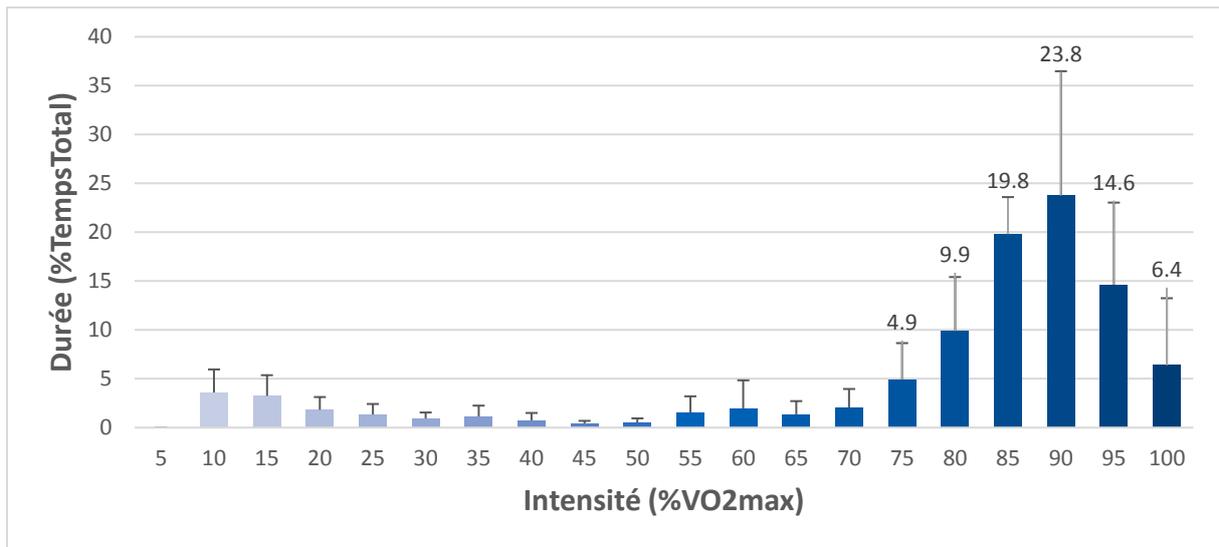


Figure 38. Consommation d’oxygène moyenne par zones d’intensité

Cette haute intensité se confirme également lorsque l’on observe la répartition du temps passé selon les zones définies par les seuils ventilatoires (figure 39), avec en moyenne plus d’un quart (27%) de la course passé au-delà du SV2.

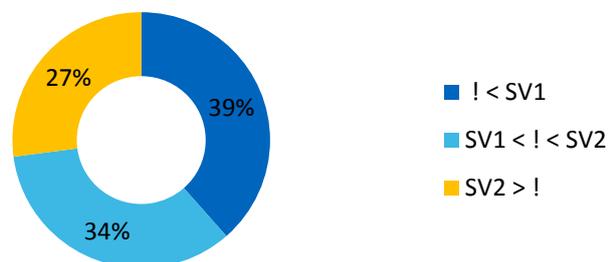


Figure 39. Répartition de la consommation d’oxygène selon les seuils métaboliques

La dernière donnée que nous avons recueillie est le niveau d’activité musculaire. Nous avons étudié séparément les phases actives de pédalage et les phases statiques, déterminées à partir du compte-tours installé sur le vélo. La phase statique qualifie les instants où la cadence a été mesurée comme étant inférieure à 40 rotations par minute. Nous avons donc analysé les phases de propulsion, où le coureur tourne les jambes, en découpant, pour chaque cycle de pédalage, l’ensemble des données d’activation musculaire, afin d’en réaliser la moyenne. Nous avons ainsi représenté l’évolution de l’activité musculaire au cours du geste (figure 40).

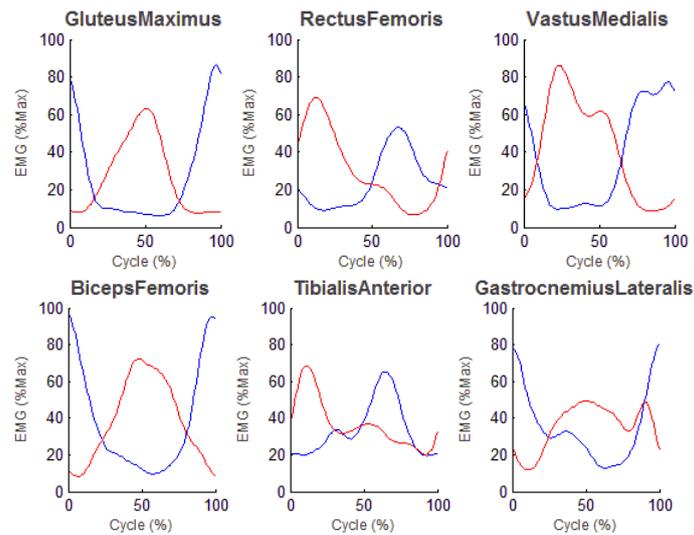


Figure 40. Evolution de l'activité musculaire moyenne au cours du cycle de pédalage. Le départ du cycle se fait manivelle à l'horizontale et pied droit en avant (Jambe droite en bleu et jambe gauche en rouge)

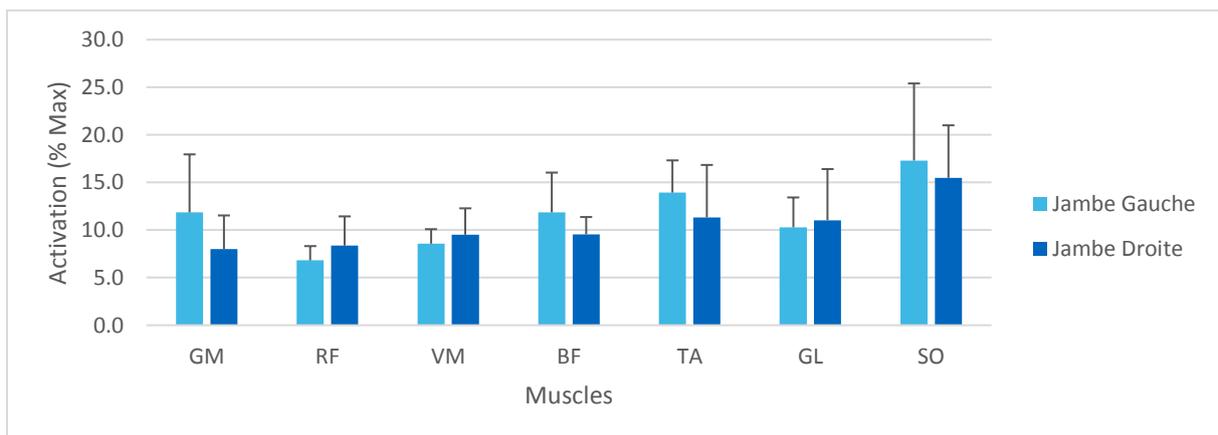


Figure 41. Représentation de l'activité musculaire moyenne lors des phases statiques

Lors des phases statiques (figure 41), le niveau d'activité musculaire moyen de l'ensemble des muscles étudié est de 11%. Mais certains sujets ont présenté une activité pouvant dépasser 25% pour certains muscles (GL et SO). Nous avons pu également constater que des différences intra individuelles étaient présentes concernant les patterns d'activation des muscles des jambes droite et gauche, tout comme certains déséquilibres lors des périodes de non-pédalage.

2.2.4. Discussion

L'objectif de cette première recherche était de déterminer les caractéristiques de la performance en VTT XCO moderne. Par l'intermédiaire de mesures pluridisciplinaires de terrain, nous avons pu étudier la manière dont les athlètes ayant atteint un haut-niveau de performance gèrent les différents aspects de cette discipline. Grâce à nos différentes acquisitions et observations, nous avons soulevé un certain nombre de questionnements et mis en valeur des aspects encore peu ou pas abordés par la littérature.

Concernant la répartition du temps passé selon la topographie, on peut remarquer que la moitié du temps est passée en montée ce qui semble logique car on est moins rapide dans ces moments-là. Il est intéressant de noter également qu'un peu moins d'un tiers du temps en moyenne se déroule en descente. Si l'on regroupe les zones de transition et de plat, nos mesures (figure 42, à droite) concordent parfaitement avec les données présentées dans l'étude de Abbiss et al (2013) au sujet du rythme de course lors d'une compétition de VTT XCO (figure 42, à gauche).

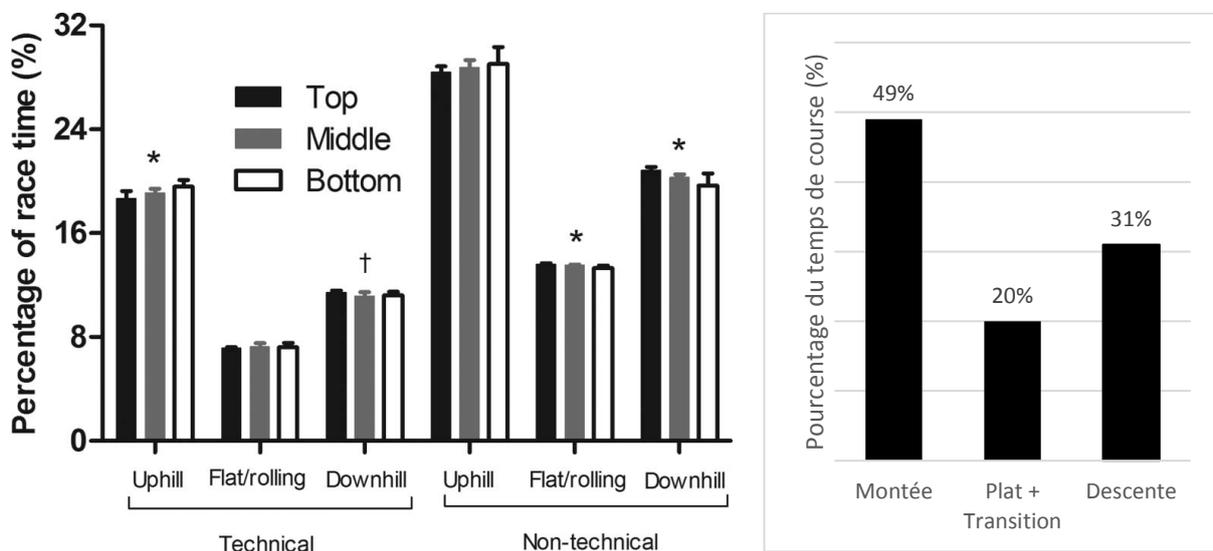


Figure 42. Répartition du temps passé dans chaque zone (Uphill = Montée ; Flat/Rolling = Plat/Roulant ; Downhill = Descente) selon la technicité et selon le classement des coureurs (Top, Middle and Bottom Performers) (d'après Abbis et al, 2013)

Abordons maintenant la question de la fréquence de pédalage. La visualisation des données de cadence relatives à la VO_{Opt} permet de se rendre compte de deux principaux points. Tout d'abord le temps de non-pédalage est relativement constant parmi le groupe de sujets et se trouve être en moyenne de presque un quart ($24.6 \pm 3.2 \%$) de la durée totale de course. Cela s'explique par le fait que 31% du temps de course est passé dans des sections en descente. Ces secteurs sont souvent techniques et certaines phases demandent plus de la qualité de pilotage que de la qualité de pédalage. Nous pouvons toutefois nous questionner sur la nature de ces périodes que nous avons tendance naturellement à assimiler à des phases de récupération. Une analyse plus poussée (durée et fréquence de ces phases) pourrait en partie permettre de répondre à cette interrogation, mais l'étude de l'activité musculaire peut aussi apporter des informations.

Dans les instants particuliers où les jambes de l'athlète ne sont pas motrices, nous observons un niveau de sollicitation systématique (en moyenne 11% du maximum) qui représente une part non-négligeable d'effort (figure 41). Bien qu'une certaine disparité entre les muscles ait été relevée selon les sujets, cette activité résiduelle est présente chez l'ensemble des coureurs. Elle correspond au travail isométrique des membres inférieurs nécessaire à la stabilisation du corps ainsi qu'à leur lutte pour contrer les vibrations et les chocs subis lors de la descente. Concernant l'évolution de l'activité musculaire moyenne au cours du geste (figure 40), nous avons retrouvé un comportement similaire à celui décrit lors de précédentes études (Rouffet & Hautier, 2008). Les différences pouvant apparaître entre les jambes sont le reflet de la gestion des athlètes à la contrainte et montrent qu'ils adaptent leur réponse à la sollicitation en fonction de leur capacité. Cela met en évidence la capacité du corps humain à répondre à un même effort de plusieurs manières possibles.

Enfin, après avoir observé les oscillations latérales enregistrées par l'inclinomètre, nous pensons que les mouvements repérés lors des phases de relances pourraient traduire l'implication du haut du corps et de la traction des bras sur le cintre. Des recherches menées dans la discipline du BMX ont suggéré l'intérêt de ce type de mouvement pour la production de puissance (Rylands et al., 2015). Pour ce qui est de la répartition des fréquences de pédalage, nous pouvons constater que les athlètes utilisent très peu les plages de cadences élevées et supérieures à leur VO_{Opt}. La littérature montre que, même si elles permettent de réduire la

fatigue neuro-musculaire et la demande de production de force musculaire, des fréquences trop importantes entraînent une augmentation du coût métabolique du pédalage (Abbiss et al., 2009). Ainsi, dans une discipline telle que le XCO, qui requiert une bonne gestion de ses ressources énergétiques, il est logique que les athlètes cherchent à limiter les situations de haute vélocité. Cependant, il faut garder à l'esprit la diversité inter-individuelle marquée qui nous empêche de dégager un profil généralisé.

Lorsque l'on s'intéresse aux données recueillies grâce à l'analyseur d'échanges gazeux, nous observons alors qu'un peu moins de 30% du temps total de course est passé au-delà de SV2, ce qui indique un travail important à haute intensité et une sollicitation non négligeable de la filière anaérobie de production d'énergie. Ces résultats vont dans le sens de la littérature et confirment les observations précédemment réalisées (Macdermid & Stannard, 2012). La distribution moyenne de la consommation d'oxygène selon le niveau d'intensité (figure 38) est elle aussi tout à fait comparable avec les recherches préexistantes comme celle d'Impellizzeri *et al* (2002) (figure 43).

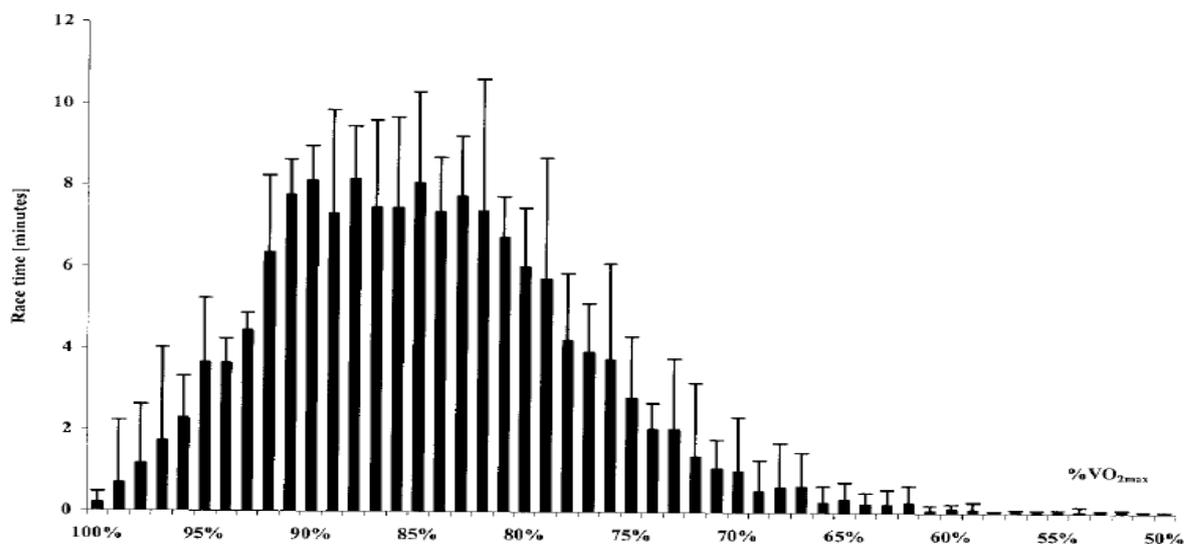


Figure 43. Répartition de la consommation d'oxygène durant une course selon le niveau d'intensité (d'après Impellizzeri *et al*, 2002)

Toutefois, ces informations de cadence et de dépense physiologique portent sur la globalité de l'exercice et ne permettent pas de détailler précisément la dynamique réelle des efforts. De plus, il s'agit là de données moyennées et il faut faire attention aux différences interindividuelles qui se manifestent par exemple lorsque l'on regarde la valeur moyenne de

VO₂ durant l'effort. En effet, lorsque l'on calcule le niveau de consommation d'oxygène moyen pour chaque athlète lors de la course, on observe de grands écarts interindividuels (Min : $51.5 \pm 4,9 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$; Max $70.6 \pm 4,9 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$). Certains sujets semblent avoir tendance à varier plus rapidement ce qui pourrait se traduire par une difficulté à lisser leurs efforts lors des changements de rythme (figure 37, Athlètes 2, 3 et 4). Nous pouvons observer que d'autres en revanche vont conserver plus de constance dans cet exercice (figure 37, Athlètes 1 et 5). Les mécanismes de gestion de l'effort semblent donc dépendants de l'athlète (Abbiss *et al.*, 2006).

2.3. Synthèse

Dans cette première partie de notre travail, nous nous sommes efforcé de recueillir des données de terrain afin de chercher à caractériser la pratique du VTT XCO moderne. Nous avons pu observer différentes composantes de la discipline telles que l'action motrice des membres inférieurs, l'interaction avec le vélo ou encore le rendement énergétique de l'athlète.

Les principaux résultats qui ressortent de cette recherche concernent tout d'abord l'aspect physiologique de la discipline. En effet, nous avons pu constater que le XCO dans son format actuel présentait de nombreuses phases de haute intensité. Lors d'un tour de circuit à allure de compétition, les athlètes passent plus d'un quart du temps total de course au-dessus du second seuil ventilatoire. Cela nous prouve que cette pratique ne rentre pas dans la catégorie des disciplines d'endurance uniquement. Cependant notre approche ne nous a pas permis d'établir précisément l'évolution des efforts en course. La répartition des fréquences de pédalage est l'autre élément d'importance à mettre en avant dans cette étude. Nous avons observé qu'en moyenne, un quart du temps de course est constitué de phases de non-pédalage, et que ces phases ne permettaient pas une récupération totale car un effort musculaire minimal mais non-négligeable est produit. Nous avons également pu constater que les coureurs avaient tendance à se placer la plupart du temps dans des plages de cadence plutôt inférieures à leur fréquence optimale mécanique (majoritairement vers 70-80% de VO_{Opt}). Cette orientation pourrait s'expliquer par la recherche de conditions permettant une économie physique plus importante, qui est une caractéristique des plus faibles cadences. Les différences interindividuelles ont également été marquées dans certains domaines de mesure comme l'activité musculaire et la dépense énergétique. L'approfondissement de la détection de ces différents profils de gestion de l'effort pourrait être intéressant dans le futur, dans une démarche d'individualisation de l'entraînement.

Ces premières informations dessinent le contour de la pratique du XCO, toutefois, le groupe d'athlètes de haut-niveau avec lequel nous avons travaillé était un panel trop restreint pour dégager un quelconque résultat statistique, surtout sur un seul tour de circuit. C'est pourquoi nous pensons que pour caractériser plus concrètement la discipline, il est pertinent de s'orienter vers une étude plus complète de la dynamique des efforts en VTT XCO moderne.

3. Evaluation de la dynamique des efforts en XCO durant la course

Après les premiers éclaircissements apportés par le chapitre précédent, il nous semble nécessaire de consolider ces connaissances en menant à bien une nouvelle étude qui soit moins exploratoire, et notamment en s'intéressant tout particulièrement à la dynamique des efforts en situation compétitive. En effet, la cinétique de course en XCO étant discontinue, il paraît important de détailler le rythme de la pratique ainsi que les implications des récentes évolutions sur la physiologie des coureurs.



Figure 44. Photographie d'un athlète du pôle France de VTT en pleine expérimentation sur le parcours labellisé FFC de la Chapelle des Buis 2016 (Besançon) ©YvanClolus

3.1. Etat des lieux et analyse des connaissances actuelles

A la suite de notre première expérimentation nous avons pu constater, grâce à l'analyse des échanges gazeux, que la pratique du VTT XCO moderne était une activité nécessitant un effort continu mais également avec des phases de très hautes intensité. Certaines études ont démontré que la capacité anaérobie peut être un facteur prédictif de performance en VTT ce qui tend à montrer l'importance de ces phases particulières (Inoue et al., 2012). Cependant, la dynamique des efforts au cours de la pratique n'a pas encore été précisément établie. Il convient alors d'analyser plus en détails la cinétique de course. En effet, même si le rythme de course était comparable à celui en compétition officielle lors de notre expérimentation, l'activité de VTT XCO se déroule normalement sur plusieurs tours de piste et avec un certain nombre d'adversaires, ces deux paramètres apportant ainsi des contraintes supplémentaires au niveau de la gestion de l'effort et de la stratégie de course. Nous nous sommes donc légèrement éloigné de la nature de la pratique en réalisant des acquisitions sur un coureur seul et sur un seul tour. Il convient donc de vérifier nos analyses dans des conditions plus écologiques, qui nous permettront d'observer également les changements des paramètres biomécaniques et physiologiques entre les tours.

Rythme de course et typologie des efforts

Le rythme de course a déjà été montré comme étant non-linéaire et variant selon les sections d'un parcours (Abbiss et al., 2013), les *Top Performers / Hommes / Elite ♂* passent un moindre pourcentage de temps dans les sections de montée technique de la course comparé (respectivement) aux athlètes *Middle&Low Performers / Femmes / Junior ♂*. Mais cependant il n'y a pas eu, à notre connaissance, de différence de rythme montrée entre les tours. Plusieurs autres types d'analyses ont déjà été menées au sujet des exercices prolongés de cyclisme. Certains chercheurs se sont intéressés aux effets biomécaniques de ce type d'effort. Il a par exemple été montré que les coureurs sont moins efficaces en phase de traction avec une contribution de force plus importante lors de la phase de poussée après une longue session de

pédalage (Sanderson, 2003). D'autres ont essayé de comprendre la cinétique de la fatigue en lien avec les stratégies nutritives (Fritzsche et al., 2000). Ils ont montré qu'au cours d'un effort d'environ 2h en vélo de route (à 62% de VO₂max) la puissance maximale développée sur 4 secondes diminue de 15% sans apport énergétique et seulement de 7% avec un apport exogène de glucides. Cependant, la plupart de ces études scientifiques existantes qui portent sur les caractéristiques de la discipline ont été menées avant l'évolution réglementaire majeure de 2007 (Gregory, 2002; F. Impellizzeri et al., 2002; Lee et al., 2002; Stapelfeldt et al., 2004; F. M. Impellizzeri & Marcora, 2007).

Certains résultats ont montré que la consommation d'oxygène maximale (VO₂max) et la puissance maximale aérobie (PMA) étaient fortement corrélées avec la performance en compétition de XCO ($r = 0,6-0,9$) (F. M. Impellizzeri et al., 2005; Gregory et al., 2007; Prins et al., 2007). Toutefois, Impellizzeri et ses collaborateurs (2005) ont signalé qu'environ 40 % de la variance de la performance seulement s'expliquait par ces paramètres physiologiques et qu'une grande partie de la variance de la performance demeurait inexpliquée. Plus récemment, Inoue et ses collaborateurs (2012) ont examiné la corrélation entre le temps de course en XCO et la puissance anaérobie évaluée par un test Wingate suggérant que la puissance anaérobie est également un déterminant important de la performance en compétition de XCO ($r = -0.79$). De plus, pour les sports ayant un rythme complexe comme le VTT, la demande physiologique de la course est difficile à évaluer à partir de mesures en laboratoire (Thomas Reilly et al., 2009). Les méthodes de terrain sont donc mieux adaptées pour évaluer la variabilité des exigences du XCO, caractérisé par un rythme explosif en début de course, suivi d'accélération intermittentes (Stapelfeldt et al., 2004), une grande variabilité en puissance, direction, vitesse et cadence dans les différentes parties du tour et le rôle des muscles supérieurs du corps pour résister aux vibrations en descente (Hurst & Atkins, 2006).

Cependant cela est peu étudié en tout-terrain, la difficulté venant des ruptures de rythme durant les courses qui sont nettement plus nombreuses et plus marquées que sur route. Il faut même faire attention aux conditions des tests car on peut parfois relever de grandes disparités dans les résultats. Par exemple sur la mesure de perte de force en post-exercice, une étude de Millet et al (2003) montre qu'après une épreuve cyclo-sportive d'environ 5h, on constate une réduction des valeurs de Contraction Maximale Volontaire (CMV)

des muscles extenseurs du genou de 9%, alors qu'après un exercice d'une durée similaire effectué sur un ergocycle, Lepers et al. (Lepers et al., 2002) a mis en avant une perte de 18%. Cela peut souligner la nature discontinue de la pratique cycliste en tout-terrain.

Dans la plupart des études, lors de courses simulées réalisées dans un contexte écologique, les caractéristiques du XCO ont été décrites à l'aide de données basées sur la fréquence cardiaque (FC) et la puissance de sortie (Stapelfeldt et al., 2004; Gregory et al., 2007), mais avec peu d'égards envers la nature oscillante de la charge mécanique requise pour différentes parties de la course. Plus récemment, Viana et al. (2018) et Garnier et al. (2018) ont examiné les stratégies des athlètes au cours des différents tours du format XCO actuel lors de courses simulées ou réelles. Les résultats indiquent que tous les cyclistes adoptent des stratégies de cadence similaires entre les tours en utilisant une stratégie de départ rapide suivie d'un rythme plus régulier.

La situation actuelle

La pratique du VTT se présente donc comme étant véritablement spécifique et évolutive, et les changements relativement récents dans la nature profonde de cette activité nous incitent à l'étudier plus précisément. Afin de mieux prescrire les directives d'entraînement optimales pour la course, les scientifiques et les entraîneurs ont besoin de plus de données sur les exigences réelles de la compétition avec une analyse plus approfondie de la dynamique des réponses physiologiques et mécaniques pendant toute une course, ou *a minima* plusieurs tours et un temps nécessaire pour réaliser le circuit proche de la compétition réelle. Il apparaît donc essentiel, dans notre objectif de détermination des caractéristiques du VTT XCO moderne, de mettre en place une expérimentation permettant d'étudier ces nouvelles contraintes biomécaniques et physiologiques. C'est donc dans ce cadre que ce projet se développe, avec la convergence de notre volonté d'analyser les déterminants de la performance en VTT, et du questionnement des athlètes de haut-niveau sur l'évolution de leur discipline. Le but commun qui en découle est la volonté de redéfinir la réalité des efforts en XCO moderne dans le but de pouvoir adapter la préparation et les entraînements. L'objectif de cette étude était donc de décrire les caractéristiques mécaniques et physiologiques de cette discipline lors d'une course

simulée complète. Plus précisément, cette étude a analysé les variations dans les réponses physiologiques et la puissance de sortie entre les tours et les sections de montée ou de descente. Notre hypothèse était que le XCO moderne est une discipline cycliste au comportement acyclique qui entraîne des contraintes physiologiques et mécaniques spécifiques pouvant varier selon les tours.

3.2. Etude des contraintes liées à la pratique moderne du XCO

3.2.1. Matériel et méthode

L'étude que nous avons menée s'est donc placée dans la continuité de la première expérimentation, qui nous a apporté des informations intéressantes sans toutefois nous permettre de pouvoir généraliser nos observations. Nous nous sommes donc attaché à proposer un cadre de recherche plus spécifique en se focalisant sur certains paramètres physiologiques et biomécaniques des athlètes et en cherchant à se rapprocher au maximum d'un contexte de pratique en compétition. Pour cela, nous avons demandé à des cyclistes de VTT XCO, de niveau national et international espoir, de réaliser plusieurs tours sur un parcours officiel de compétition labélisé par l'UCI. Il s'agissait pour eux de prendre part à une course simulée tout en étant équipé d'outils de mesure nous permettant de recueillir leur consommation d'oxygène, leur rythme cardiaque, leur puissance développée et leur position GPS. Notre attention s'est particulièrement portée sur l'étude des phases de haute intensité, sur la comparaison entre les tours et sur le lien entre les différentes données et la performance.

Sujets

Les participants à cette étude étaient 16 hommes, de catégories juniors ou U23, divisés en deux groupes. Le premier groupe (G1) était composé de 9 cyclistes de niveau national ou international (Age : 18.6 ± 2.2 ans, Taille : 176.7 ± 6.7 cm, Masse : 63.3 ± 5.5 kg, Consommation maximale d'oxygène : 66.5 ± 3.2 ml.min⁻¹.kg⁻¹ ; et Puissance maximale aérobie : 319.5 ± 39.5

W). Le second groupe (G2) de 7 athlètes appartenait à un jeune groupe d'entraînement de haut niveau de l'équipe nationale (Age : $17.2 \pm 1,6$ ans ; Taille : $171,3 \pm 9$ cm ; Masse : $61,6 \pm 7$ kg ; Consommation maximale d'oxygène : $62,7 \pm 9,1$ ml.min⁻¹.kg⁻¹) et Puissance maximale aérobie : 355 ± 60 W). Tous les participants ont signé un contrat avec leur équipe qui comprend un partenariat avec le laboratoire pour collaborer à des expériences de collecte de données (pour les mineurs, tous les contrats sont contresignés par les parents). Le protocole de l'étude respectait les normes énoncées dans la Déclaration d'Helsinki, tous les participants étaient volontaires et toutes les procédures ont été approuvées par le Comité local d'éthique de la recherche.

Protocole

Tous les participants ont pris part à deux courses XCO séparées par un mois. La première course était une compétition officielle que nous avons utilisée comme référence pour le temps de course. La deuxième était une course simulée organisée sur la même piste que la course officielle. Une semaine avant d'effectuer la course simulée, tous les coureurs ont effectué un test pour déterminer leur profil force/vitesse ainsi qu'un protocole incrémental discontinu sur un ergocycle (Lode Excalibur Sport, Groningen, Pays-Bas) pour évaluer leur consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2\text{max}$), leur puissance maximale aérobie (PMA) et les seuils ventilatoires. Le choix d'un test discontinu a été fait afin d'éviter de surestimer les athlètes qui peuvent avoir des capacités anaérobies élevées (Riboli et al., 2017). Les gaz expirés ont été mesurés à chaque respiration par un analyseur de gaz (K5, Cosmed Srl, Rome, Italie). Après un échauffement de 5 minutes à 100 Watts, la puissance demandée a été augmentée de 30 Watts toutes les 2 minutes. Chaque étape a été suivie d'un repos de 30 secondes (Washburn & Seals, 1983). $\dot{V}O_2\text{max}$ a été déterminé à partir des quatre valeurs les plus élevées de $\dot{V}O_2$ enregistrées lorsque $\dot{V}O_2$ a atteint un plateau à la fin du protocole incrémental, la PMA a été définie comme la puissance maintenue pendant plus d'une minute à l'étape qui a provoqué $\dot{V}O_2\text{max}$ (V. Billat & Koralsztein, 1996). Le premier seuil ventilatoire (SV1) a été défini comme le moment où une inflexion dans la linéarité du volume expiratoire (VE) a été observée et où une augmentation systématique de l'équivalent ventilatoire pour O₂ ($VE/\dot{V}O_2$) et de la fraction de O₂ expiré (FEO₂) a fait son apparition. Le deuxième seuil ventilatoire (SV2) a été défini sur la base d'une augmentation secondaire de la VE et du ratio $VE/\dot{V}O_2$, ainsi qu'une augmentation marquée de l'équivalent ventilatoire du CO₂ (VE/VCO_2) combinée à une diminution de la fraction du CO₂

expiré (FECO₂) (McLellan, 1985). La fréquence cardiaque (FC) a été surveillée en continu tout au long du test à l'aide d'un moniteur de fréquence cardiaque télémétrique (Garmin, Suisse) et du capteur FC de l'analyseur de gaz.

Compétition simulée de XCO

La phase expérimentale a consisté en une simulation d'une course de compétition réalisée sur 2 circuits différents (C1 et C2) labellisés par la Fédération Française de Cyclisme et les entraîneurs nationaux des équipes de France VTT. Le premier groupe (G1) a parcouru en VTT le parcours C1 (longueur : 5,55 km ; dénivelé : 170m), le second groupe (G2) a parcouru en VTT le parcours C2 (longueur : 4,55 km ; dénivelé : 260m). La proximité des températures enregistrées sur les circuits par le thermomètre de l'analyseur de gaz (K5, Cosmed Srl, Rome, Italie) (G1 $21,9 \pm 1,9$), (G2 $16,3 \pm 2,3$) et dans les laboratoires des essais de détermination de la VO₂max (G1 $21 \pm 0,5$), (G2 $18,5 \pm 0,6$) permettent de mettre de côté les potentiels effets négatifs de la température sur la VO₂ (Lafrenz et al. 2008). Les échanges gazeux (K5, Cosmed Srl, Rome, Italie), la fréquence cardiaque (Garmin, Ltd, Schaffhouse, Suisse), la puissance (Rex1 inpower, Rotor, Madrid, Espagne) et la position GPS (Garmin Edge 520 Ltd, Schaffhouse, Suisse) sont mesurés en continu.

Pendant la course simulée, après un échauffement standardisé, deux cyclistes de même niveau de performance (du classement national) ont participé à la même course pour imiter les conditions de compétition. Chaque course consistait en trois tours (comme en compétition niveau junior) avec une période de repos de 30 secondes entre les tours, au cours de laquelle un questionnaire de sensations était proposé aux les participants qui ont été autorisés à s'hydrater *ad libitum*. Durant ces périodes, les cyclistes étaient autorisés à respirer sans le masque de l'analyseur de gaz (Gullstrand, 1994).

Évaluation physiologique et mécanique lors de la compétition simulée

Les échanges gazeux (K5, Cosmed Srl, Rome, Italie), la FC (Garmin, Ltd, Schaffhouse, Suisse), la puissance de sortie (Rex1 inpower, Rotor, Madrid, Espagne) et la position GPS (Garmin Edge 520 Ltd, Schaffhouse, Suisse) ont été continuellement enregistrés pendant tous les passages (enregistrement fréquence 1Hz, sauf pour les échanges gazeux : respiration par respiration). Afin d'atténuer la variabilité des respirations liée aux irrégularités de la ventilation, et plus

particulièrement dans cet exercice spécifique par le rôle des vibrations sur la ventilation, les données de respiration et de FC ont été lissées par moyenne mobile en groupe de 10 respirations. Le système Rotor est un puissance-mètre qui mesure la puissance d'un seul côté avec des jauges de contrainte dans le bras de la manivelle gauche. Ce système a été récemment comparé à différents puissance-mètres portables en cyclisme sur route (SRM, Powertap, SRAM Quark, Stages powermeter) et a montré une constance élevée (Estimation de l'erreur-type : 2W ; Intervalle 95% (Bland-Altman): $\pm 6W$ et Corrélations intraclasse : 1.00) (Sanders et al., 2017). La puissance du système Rotor a été calibrée à partir de la puissance de l'ergocycle LODE. Le temps au tour et la performance globale ont été mesurés en fonction des valeurs GPS.

Deux tests supplémentaires ont été mis en place de manière spécifique pour chaque groupe. Avec le premier groupe (G1), une session de sprints répétés a été menée avant et après la course. Il s'agissait d'accélération de 6 secondes répétées 6 fois avec 30 secondes de récupération entre chaque. Pour cela, le cadre du VTT de chaque athlète était placé sur un ergocycle (Cyclus2, RBM Electronics, Leipzig, Allemagne) dont la force initiale était égale à la moitié de la force maximale déterminée à partir du test de force/vitesse effectué une semaine avant les essais. Pour ce qui est du second groupe (G2), un dispositif d'acquisition supplémentaire a été placé sur la selle des coureurs. Il s'agissait de connaître la posture des athlètes tout au long de la course grâce à quatre capteurs de pressions (Noraxon Inc, Scottsdale, Etats-Unis) disposés de manière à savoir si les athlètes étaient assis complètement, assis sur le bec de selle uniquement ou alors en danseuse (voir figure 45).



Figure 45 – Disposition des capteurs de pression sur l'assise

3.2.2. Traitement des données

Analyse des données

La consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) et les valeurs de FC ont été exprimées en % $\dot{V}O_{2max}$ et %FCmax, et réparties en trois zones d'intensité physiologique. La première zone (Z1) était la région physiologique sous SV1, la deuxième zone (Z2) correspondait à une région entre SV1 et SV2, et la troisième zone (Z3) était située entre SV2 et $\dot{V}O_{2max}$. Les puissances de sortie collectées au cours des différents tours ont été exprimées en %PMA et divisées en quatre zones de puissance (Bernard et al., 2009) : P1 en dessous de la puissance correspondant à SV1, P2 entre la puissance correspondant à SV1 et SV2, P3 entre la puissance supérieure à SV2 et PMA, et P4 pour la puissance supérieure PMA. Les efforts de P4 ont été subdivisés en cinq catégories en fonction de leur durée : 1-5 sec, 6-10 sec, 11-15 sec, 16-20 sec, et plus de 20 sec. La durée de chaque intervalle de temps, exprimée en pourcentage du temps total au-dessus du PMA, et le nombre d'actions pour chaque intervalle de temps ont été indiqués. Le temps passé sans pédaler a également été évalué comme une cinquième zone appelée NP.

Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide d'un logiciel statistique (STATISTICA, StatSoft Inc., Tulsa, Etats-Unis). Toutes les données ont été exprimées en moyenne \pm écart-type. Les corrélations entre le temps passé dans chaque zone exprimée en % $\dot{V}O_2$ et exprimée en %FC et les corrélations entre le temps passé dans chaque zone exprimée en % $\dot{V}O_{2max}$ et exprimée en %PMA, ont été calculées en utilisant le coefficient de corrélation de Pearson. La consommation d'O₂ et la FC mesurées avant le début des essais sur le terrain, et les données sur l'O₂, la FC et la puissance de sortie recueillies pendant chacun des tours distincts ont été placées dans leurs zones respectives d'intensité physiologique et de puissance. Des ANOVA à mesures répétées ont été effectuées pour tester les différences entre chaque tour en utilisant le temps passé dans les zones physiologiques et de puissance comme variables dépendantes. Le seuil de signification statistique a été fixé à $p \leq 0,05$. Lorsqu'un effet a été observé, la différence entre les périodes a été évaluée au moyen d'un test post hoc Newman-Keuls. Lorsqu'une différence a été identifiée, la taille de l'effet a été calculée sur la base du d de Cohen (1988). L'effet a été classé petit ($d \geq 0,2$), moyen ($d \geq 0,5$) ou grand ($d \geq 0,8$).

3.2.3. Résultats

Paramètres de la course

Quel que soit le groupe, aucune différence significative de performance n'a été constatée entre la course simulée et la compétition officielle (course simulée vs course officielle : $64 \pm 1,5$ min vs 66 ± 2 min).

Demande physiologique

En analysant une première fois les données de VO_2 , aucune différence de stress physiologique n'a été observée entre les parcours (C1 et C2), ils ont donc été analysés conjointement. Le temps passé dans chaque zone de VO_2 pendant les différents tours est présenté dans le tableau 3. Tout au long de la course, $29,4 \pm 10\%$ du temps a été passé sous la valeur SV1, $33,6 \pm 2,7\%$ dans la deuxième zone et $37,0 \pm 10,9\%$ du temps des participants a été passé au-dessus de la valeur SV2. Une différence significative entre les tours a été observée en termes de temps passé en Z1 ($F(2,30)=17.49$, $p<0.05$) et en Z3 ($F(2,30)=11.45$, $p<0.05$). Une augmentation modérée du temps passé dans la première zone a été enregistrée entre le premier et le deuxième tour ($d=0.74$) et entre le deuxième et le troisième tour ($d=0.46$). Globalement, une forte augmentation du temps passé en Z1 a été observée entre le premier et le troisième tour ($d=1.16$). Simultanément, une forte diminution du temps passé en Z3 a été observée entre le premier et le troisième tour ($d=1.07$). Aucune différence significative entre les tours n'a été observée ($F(2,30)=0.41$, $p=0.66$) pour le temps passé dans la deuxième zone.

		Z 1	Z 2	Z 3
VO_2 (%TempsTotal)	Tour 1	19.8 ± 15.6 *†	31.4 ± 15.6	48.8 ± 15.1 *†
	Tour 2	28.7 ± 16.0 *‡	36.6 ± 16.5	34.7 ± 15.6 *‡
	Tour 3	39.7 ± 13.8 †‡	32.9 ± 17.3	27.4 ± 16.0 †‡
FC (%TempsTotal)	Tour 1	17.1 ± 8.9	53.2 ± 8.6	29.7 ± 6.2
	Tour 2	12.9 ± 11.1	52.5 ± 9.3	34.6 ± 5.7
	Tour 3	15.4 ± 8.4	50.3 ± 12.1	34.2 ± 9.3

Tableau 3 – Pourcentage du temps total passé dans chaque zone physiologique pour chaque tour. Les données sont présentées comme moyenne \pm écart-type, avec les résultats de l'ANOVA (*: différence significative entre Tour 1 et Tour 2; †: différence significative entre Tour 1 et Tour 3; ‡: différence significative entre Tour 2 et Tour 3)

Fréquence cardiaque

Le temps passé dans chaque zone de FC pour les différents tours est présenté dans le tableau 3. Sur l'ensemble du cycle, $15,1 \pm 2,1$ % du temps a été passé à un FC correspondant à la zone sous SV1, $52,1 \pm 1,5$ % du temps a été passé dans la deuxième zone et $32,8 \pm 2,7$ % du temps à un FC supérieur à celui enregistré pour SV2. Aucune différence significative entre les tours n'a été observée pour les différentes zones (Z1 : $F(2.30)=1.13$, $p=0.34$; Z2 : $F(2.30)=0.03$, $p=0.96$ et Z3 : $F(2.30)=1.02$, $p=0.38$).

Puissance développée

Le temps passé dans chaque zone de puissance pour les différents tours est présenté dans le tableau 4. Tout au long de la course, les participants ont passé $19,2 \pm 5,0$ % du temps en NP, $30,6 \pm 9,4$ % en P1, $12,6 \pm 5,0$ % en P2, $9,4 \pm 4,6$ % en P3 et $28,2 \pm 8,1$ % en P4. Une différence significative entre les tours n'a été observée que pour le temps passé dans la zone P4 ($F(2.30)=3.67$, $p=0.03$), avec une diminution moyenne entre le premier et le deuxième tour ($d=0.62$), et une diminution moindre entre le deuxième et le troisième tour ($d=0.41$), et donc un effet important entre le premier et le troisième tour ($d=1.00$). Aucune différence significative entre les tours n'a été observée pour le temps passé dans les autres zones (NP : $F(2.30)=0.16$, $p=0.85$; P1 : $F(2.30)=1.61$, $p=0.21$; P2 : $F(2.30)=0.30$, $p=0.74$; P3 : $F(2.30)=0.09$, $p=0.92$). Cependant, on peut remarquer que les valeurs moyennes du temps passé en P1 augmentent à chaque tour et diminuent en même temps pour P4 tout en restant stables pour NP, P2 et P3.

		NP	P 1	P 2	P 3	P 4
Puissance (%TempsTotal)	Tour 1	18.8 ± 4.3	27.0 ± 8.1	11.9 ± 4.9	9.5 ± 5.1	32.8 ± 8.2 *†
	Tour 2	18.9 ± 4.6	31.2 ± 9.8	12.3 ± 5.2	9.7 ± 4.3	27.9 ± 7.9 *‡
	Tour 3	19.8 ± 6.0	33.5 ± 10.2	13.6 ± 5.0	9.1 ± 4.5	24.0 ± 8.2 †‡

Tableau 4 – Pourcentage du temps total passé dans chaque zone de puissance pour chaque tour. Les données sont présentées comme moyenne \pm écart-type, avec les résultats de l'ANOVA (*: différence significative entre Tour 1 et Tour 2; †: différence significative entre Tour 1 et Tour 3; ‡: différence significative entre Tour 2 et Tour 3)

Pour la zone P4, un effet significatif a été observé sur le pourcentage du temps total passé dans les différents intervalles de 5 secondes pendant lesquelles l'effort exercé a dépassé le PMA ($F(4.180)=24.24, p<0.05$). Le temps passé au-dessus de PMA durait le plus souvent de 6 à 10 secondes comparativement aux autres intervalles (c.-à-d. 1 à 5 secondes, 11 à 15 secondes, 16 à 20 secondes et plus de 20 secondes ; $d = 1,28$; $d = 1,23$, $d = 1,57$, $d = 2,07$, respectivement) (figure 46[A]). Un effet significatif a également été observé sur le nombre d'épisodes au-dessus de PMA, c'est à dire le nombre d'actions effectuées dans P4 ($F(4.180)=24.24, p<0.05$). Le nombre d'efforts dans la catégorie de temps de 1 à 5 secondes ($n = 22,1$, ce qui représente près de 50 % des efforts dans P4) était significativement plus élevé que dans chacune des quatre autres catégories ($d = 2,48$, $d = 3,71$, $d = 4,91$, $d = 5,51$, respectivement) (figure 46[B]).

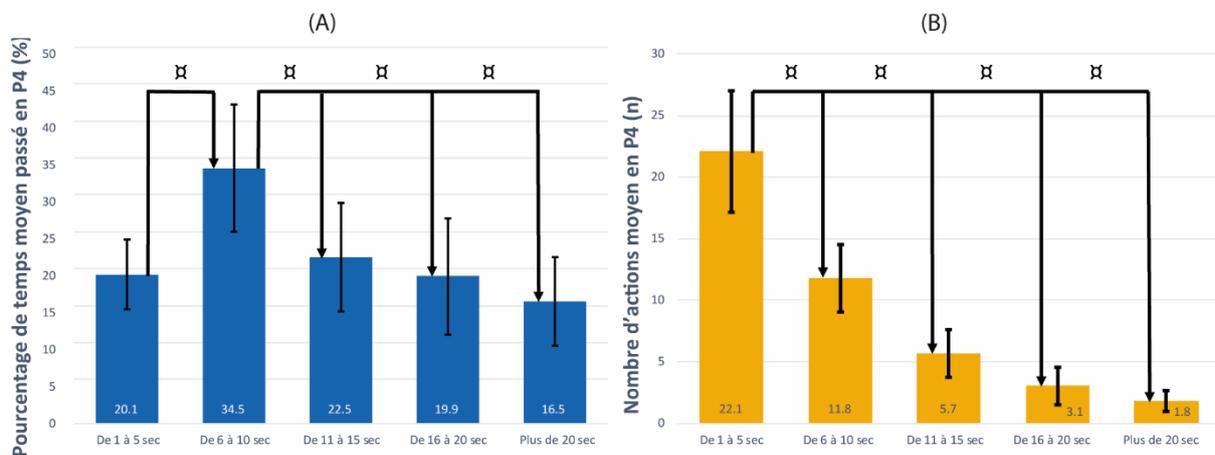


Figure 46 - (A) Pourcentage de temps moyen passé en P4 par intervalles de 5 secondes. (B) Nombre moyen d'épisodes en P4 par intervalles de 5 secondes. Quand une différence entre les tours était significative, le d de Cohen a été calculé ($\alpha d \geq 0.8$)

Corrélations entre les analyses physiologique et mécanique

Aucune corrélation significative n'a été trouvée entre le temps passé dans les zones d'intensité exprimées en $\% \dot{V}O_{2max}$, les zones d'intensité exprimées en $\%FC_{max}$ ($r=-0.01$) ou $\%PMA$ ($r=-0.02$). Afin de visualiser l'intérêt relatif de chaque analyse, l'évolution de la VO_2 et de la Puissance ont été représentées en fonction des zones d'intensité et de la position GPS (Figure 47[A], Figure 47[B] et Figure 47[C], respectivement).

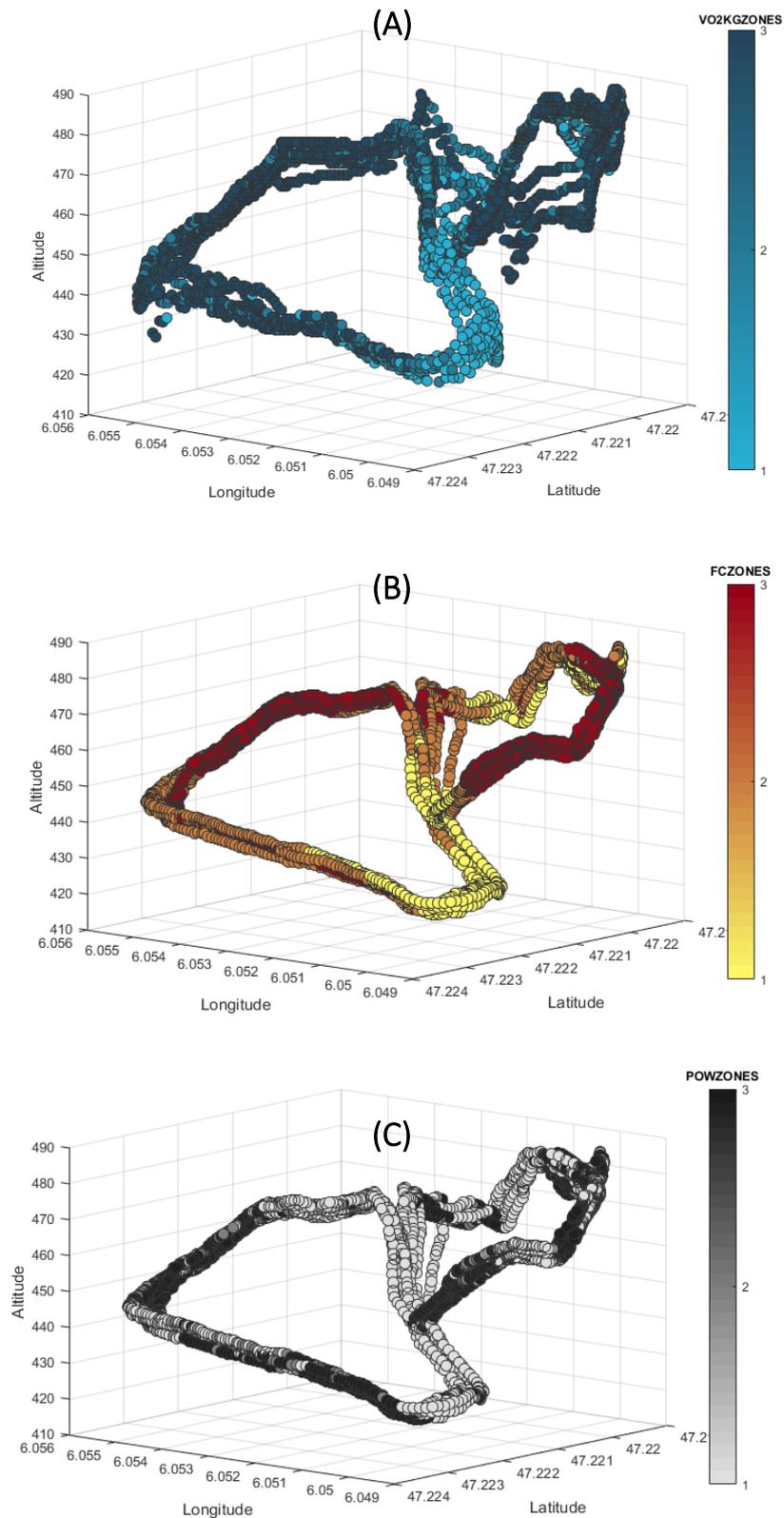


Figure 47 - (A et B) Zone physiologiques (VO_2 et FC) en fonction de la position GPS. (C) Zones de puissance en fonction de la position GPS.

(Illustration utilisant le tracé de C2 – Pour chaque graphique les points clairs correspondent à Z1 ou NP+P1; les points vivement colorés correspondent à Z2 ou P2; les points foncés correspondent à Z3 ou P3+P4)

Concernant le premier groupe, nous avons comparé les résultats des sprints répétés effectués avant et après la course en regardant particulièrement la puissance développée. Il s'est avéré que la puissance moyenne développée lors de ces accélérations courtes est comparable pour tous les athlètes dans les deux cas (voir figure 48).

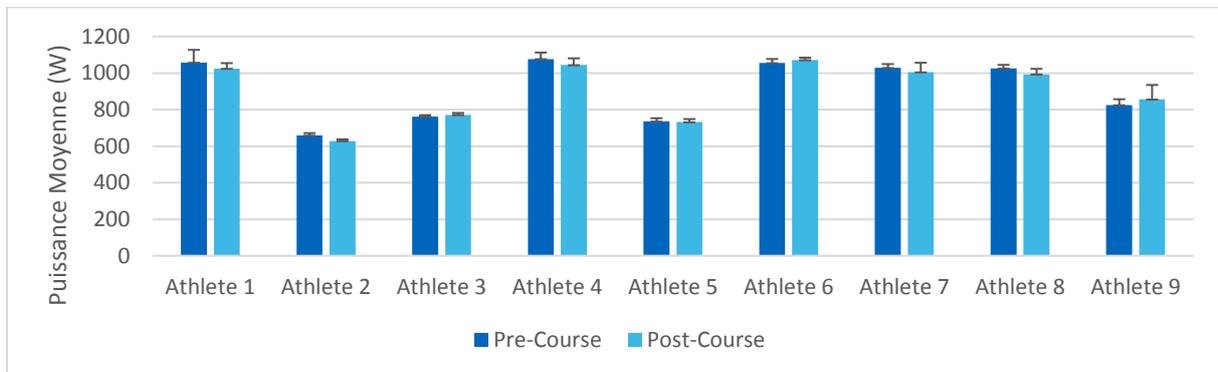


Figure 48 – Puissance moyenne enregistrée durant les 6 sprints de 6 secondes effectués avant et après la course.

Pour ce qui est du second groupe, l'observation des données de pression sur l'assise nous a permis de mettre en avant des spécificités selon les athlètes (voir figure 49). Nous avons identifié trois répartitions de postures relativement différentes. Les athlètes 1 et 2 passent très peu de temps en danseuse (moins de 5% au total) et sont placés en avant de la selle pendant plus de la moitié de la course. Le reste des coureurs passent nettement plus de temps debout (15 à 25%). Cependant les athlètes 3,4 et 5 passent plus de temps sur le bec de selle que sur la selle complète alors que les athlètes 6 et 7 ont une répartition plus équilibrée, et même un penchant pour la posture complètement assise.

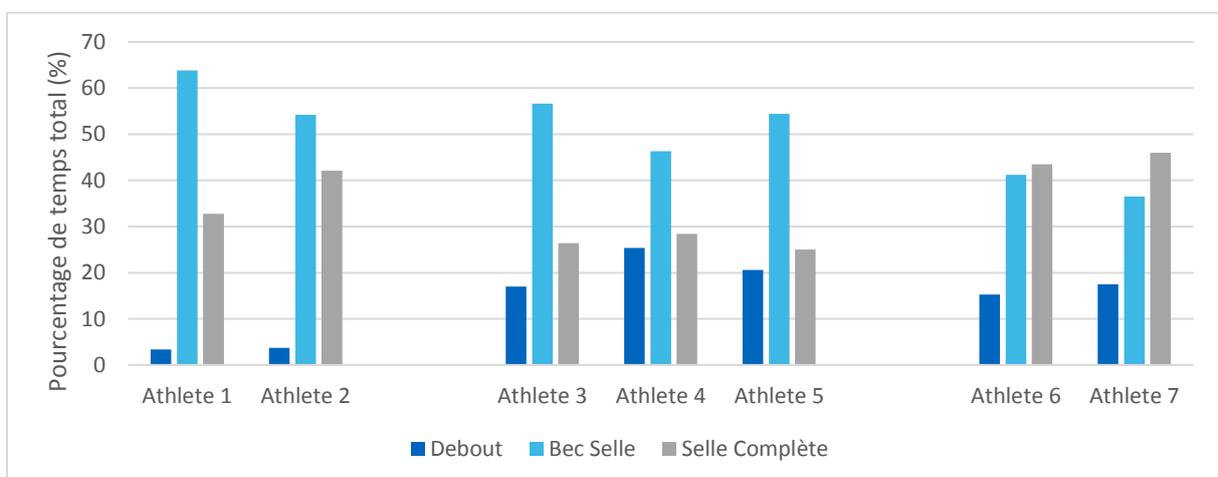


Figure 49 – Répartition des postures de pilotage en pourcentage du temps total de course

3.2.4. Discussion

Le but de cette étude était de décrire les caractéristiques physiologiques et mécaniques du format actuel du VTT XCO et d'analyser la dynamique de ses paramètres entre les tours. Les principales conclusions sont les suivantes :

- Lors d'une course de VTT XCO, une partie importante de la course se déroule au-dessus du deuxième seuil ventilatoire ou même au-delà de la PMA, ce qui indique un niveau élevé de sollicitation des voies aérobie et anaérobie ; en outre, les contributions respectives de ces voies varient entre les tours.

- Les périodes passées au-delà de PMA ont tendance à être de courtes périodes, oscillant principalement entre 1 et 10 secondes, ce qui suggère que le VTT XCO a un profil acyclique similaire à celui des sports d'équipe intermittents comme le basketball (Cormery et al., 2008).

- Les paramètres de terrain classiques, tels que le %FC ou le %PMA, ne correspondent pas aux exigences physiologiques exprimées en % $\dot{V}O_{2max}$, qui semble être le meilleur paramètre pour surveiller les exigences du VTT XCO.

De manière classique, les exigences physiologiques dans les études de terrain sur le cyclisme sont évaluées en fonction des enregistrements des FC (Luciá et al., 1999; Palmer et al., 1999; Padilla et al., 2000; F. Impellizzeri et al., 2002) et/ou du rendement énergétique (Smith et al., 2001; Stapelfeldt et al., 2004; Paul William Macdermid & Stannard, 2012), puisque le rendement énergétique est un indicateur direct du rendement mécanique (Coyle et al., 1991). Les valeurs de FC enregistrées dans cette étude étaient très similaires à celles enregistrées dans des études antérieures analysant l'ancien format du XCO (Impellizzeri & Marcora, 2007). Par exemple, Impellizzeri et ses collaborateurs (2002) ont signalé que 18 % du temps a été passé dans une zone de FC sous SV1, 52 % entre SV1 et SV2, et 30 % au-dessus de SV2, ce qui est très proche de nos résultats (tableau 3). Ainsi, lorsque les données de FC ont été utilisées, nos résultats ont indiqué que le format XCO actuel n'est pas très différent de l'ancien. Cependant, la distribution des valeurs de puissance de sortie enregistrées dans notre étude était légèrement différente de celles présentées dans les études précédentes, une explication possible pourrait être liée au fait que la durée de la course XCO a été réduite en 2007. Par exemple, Stapelfeldt et ses collaborateurs (2004) ont signalé que $39 \pm 6\%$ du temps de course a

été passé en P1, $19\pm 6\%$ en P2, $20\pm 3\%$ en P3 et $22\pm 6\%$ en P4. Par conséquent, l'augmentation du temps passé en P1 observée dans la pratique moderne pourrait être liée à la nécessité de récupérer entre les actions explosives effectuées en P4. Ceci met en évidence la nouvelle dynamique des efforts dans la pratique moderne, caractérisée par des durées plus courtes et des sections plus techniques.

Une nouveauté de cette étude est que nous avons mesuré la $\dot{V}O_2$ tout au long de la course et entre les tours. Cette approche a révélé que le temps passé dans différentes zones physiologiques d'après les valeurs de $\dot{V}O_2$ n'était en corrélation ni avec la FC ni avec la puissance de sortie. Cette différence pourrait être liée au fait que les données de $\dot{V}O_2$ reflètent les épisodes de forte intensité et les périodes de récupération entre ces épisodes, alors que la puissance reflète la puissance de sortie enregistrée au niveau de la manivelle. Dans la course XCO, les parties techniques de la course exigent des capacités de pilotage impliquant une sollicitation des membres supérieurs élevée qui n'est pas représentée dans le calcul de la puissance. Ce résultat révèle la difficulté des sports techniques à mettre en relation la puissance de sortie avec la demande physiologique et donc à ne décrire les contraintes de l'activité qu'à partir de données mécaniques.

Dans la figure 2, décrivant la représentation 3D des données de $\dot{V}O_2$ et de puissance, on peut remarquer que dans les parties supérieures de la piste, plus précisément à la fin des montées et au début des descentes, la $\dot{V}O_2$ reste dans des domaines à haute intensité contrairement à la puissance. Sur ces périodes de récupération, les données de puissance apportent peu ou pas d'informations. L'absence de corrélation entre la FC et $\dot{V}O_2$ a déjà été signalée dans des sports intermittents (Bangsbo et al., 2007). Dans le contexte du XCO, l'utilisation des valeurs de FC est encore plus limitée en raison de la présence de phases statiques, excentriques et concentriques (Dean, 1988; Arimoto et al., 2005). De plus, nos participants n'avaient le droit de boire qu'entre les tours pendant les 30 secondes de repos, donc nous ne pouvons exclure une possible déshydratation pendant la course affectant la dérive cardiaque et augmentant la différence entre $\dot{V}O_2$ et les données de FC (Coyle, 1998). Enfin, la FC pourrait être affectée par la charge mentale (Blitz et al., 1970), particulièrement présente dans les parties techniques et lorsque le risque de chute est élevé. Exprimées en $\% \dot{V}O_{2max}$, nos résultats indiquent que les filières anaérobies et aérobie sont sollicitées

pendant une course XCO, avec plus de 70% du temps de course passé au-dessus de SV1, et une intensité moyenne de $87\% \dot{V}O_{2max}$. Nos résultats démontrent aussi clairement la nature intermittente du format de course XCO, avec un recours important à des périodes d'effort de très courte durée et une proportion importante de temps passé à ne fournir aucune ou très faible puissance (NP).

Cette dynamique de course a été illustrée dans la période P4 d'une part par le grand nombre d'actions dans la zone de durée de 1 à 5 secondes ($n = 22,1$ en moyenne) et d'autre part par le temps passé dans l'intervalle 6-10 secondes ($34,5 \pm 8,6\%$ P4 temps total), ce qui suggère que la plupart des actions effectuées en P4 sont inférieures à 10 secondes. Ces phases impliquent souvent des contractions musculaires statiques et excentriques du haut du corps et sont associées à une charge de travail attentionnelle qui pourrait accélérer l'apparition de la fatigue (Mehta & Agnew, 2012). Par exemple, pendant les phases techniques de descente (avec une grande pente et beaucoup de racines ou de rochers), les athlètes ne pédalent pas mais leurs muscles sont sollicités pour absorber les chocs et maintenir leur équilibre.

Des données supplémentaires non publiées supportent également cette idée. Lorsque l'on compare les deux groupes d'athlètes sur ce paramètre précis, on peut remarquer que la répartition est globalement similaire avec une majorité de temps passé au-dessus de PMA lors d'épisodes de 0 à 10 secondes. Cependant le groupe 2, constitué de coureurs d'un niveau légèrement supérieur au groupe 1, semble avoir été capable de fournir un peu plus d'efforts de 0 à 6 secondes (voir figure 50). Il est possible que cela soit lié au niveau d'expertise, bien que ce groupe n'ait pas été identifié comme ayant des capacités physiologiques supérieures.

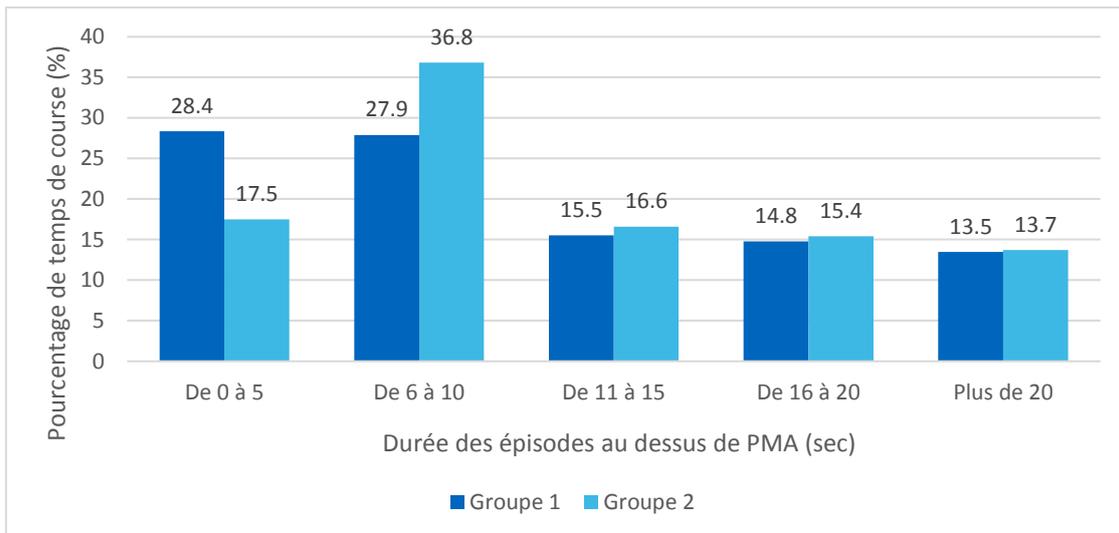


Figure 50 - Pourcentage de temps passé au-dessus de PMA selon la durée des épisodes

Une autre approche novatrice utilisée dans la présente étude a été l'analyse et la comparaison des données entre chaque tour de la course simulée. Des études récentes ont indiqué qu'avec le format actuel du XCO, les cyclistes adoptent une stratégie de départ rapide suivie d'un rythme plus régulier (Granier et al., 2018; Viana et al., 2018). Les données métaboliques enregistrées dans notre étude concordent avec ces observations puisque durant le premier tour, une plus grande proportion du temps a été passé à des niveaux d'intensité élevés (P4 et Z3) comparativement aux tours 2 et 3. Ce résultat pourrait s'expliquer par le départ groupé du format de course XCO, tel que décrit par certaines études antérieures (Impellizzeri & Marcora, 2007; Macdermid & Stannard, 2012), qui demande aux athlètes de se positionner rapidement au début de la course pour éviter d'être ralentis ou gênés par les autres cyclistes quand ils se retrouvent sur des portions étroites ou dans les sections techniques de la piste. En raison de contraintes techniques, dans notre étude, chaque course a été effectuée avec seulement deux cyclistes en même temps pour imiter les conditions de compétition et l'environnement motivationnel mais nos résultats sont en accord avec l'analyse de la cadence rapportée pendant une course réelle (Granier et al., 2018).

Les données supplémentaires recueillies spécifiquement avec chaque groupe nous apportent également quelques pistes de réflexions. Tout d'abord, les sessions de sprints répétées avec le premier groupe avant et après la course n'ont pas montré d'évolution de la

puissance moyenne. Cela nous pousse à penser que les athlètes, malgré une accumulation de fatigue certaine, semblent pouvoir être capables de reproduire ce type d'effort sans diminution de performance. Cela pourrait être lié à l'habitude qu'ils ont d'être confronté à ces phases de forte intensité courtes et répétées. Concernant le second groupe, l'analyse de la posture de pilotage s'est également révélée intéressante. Nous avons pu distinguer différents types de comportement selon les athlètes. Certains étaient très peu souvent en position debout (moins de 5% de la course) quand d'autres ont passé un quart de la course en danseuse. D'autres différenciations peuvent aussi être faites selon le niveau de l'assise (bec de selle ou assise complète). Ces profils différents qui semblent se dégager font écho à ceux que nous avons mis en évidence dans le chapitre précédent grâce aux données de consommation d'oxygène. Pour rappel, nous avons identifié deux types de comportement : une partie des athlètes était plutôt réguliers au niveau de leur dépense énergétique quand d'autres semblaient avoir un investissement beaucoup plus variable. Les coureurs passant peu de temps en danseuse vont probablement réaliser moins de relances dynamiques et avoir tendance à être plus continus dans leur stratégie de course. La gestion de l'effort se ferait donc de manière différente selon les athlètes, ce qui va imposer une réflexion associée concernant les entraînements mais également le choix du matériel à utiliser par chacun.

Les résultats présentés dans cette étude ont des applications pratiques pour les entraîneurs, les athlètes ou les scientifiques afin de développer et d'optimiser les programmes d'entraînement. Par exemple, un programme d'entraînement hebdomadaire devrait comporter un mélange de séances d'aérobic de haute et de basse intensité, ainsi que des séances visant à améliorer l'endurance intermittente de haute intensité et la capacité de sprint répété (RSA = *Repeat Sprint Ability*). Bishop et ses collaborateurs (2011), dans une *review* sur l'entraînement en RSA, recommandent deux méthodes : i) un entraînement spécifique dans l'exécution d'un entraînement répété de sprint et de résistance ; ii) travailler sur les facteurs limitants en RSA (les facteurs métaboliques comme la capacité oxydative, la récupération et le tamponnage de H⁺ ; et les facteurs nerveux comme les stratégies de recrutement et d'activation musculaire). Par conséquent, on pourrait suggérer aux coureurs de XCO qu'une semaine d'entraînement typique pourrait inclure deux ou trois séances d'entraînement intermittentes de haute intensité, comprenant de nombreux sauts, montées et descentes pour imiter les exigences de la course. En raison de la forte sollicitation des membres supérieurs lors

de ces parties techniques, un travail spécifique doit être effectué sur celles-ci. Avec ce type d'exercice, les vététistes se concentrent sur l'entraînement en résistance. Ces recommandations pratiques sont appuyées par les résultats rapportés par Edge et al (2006) ou Hill-Haas et al (2007), qui indiquent une amélioration significative des performances en RSA après un programme d'entraînement composé de 6 exercices de jambes pendant 2 à 5 séances à 15-20RM 3 jours par semaine pendant 5 semaines. Ainsi, un travail spécifique de musculation conservant un rapport poids/puissance favorable pourrait donc être recommandé pour les athlètes de XCO.

Nos résultats indiquent que le format XCO actuel représente un sport acyclique et intermittent qui diffère des épreuves cyclistes classiques et se rapproche de certains sports d'équipe à haute intensité. La pertinence des valeurs de $\dot{V}O_2$, comparées aux valeurs de FC et de puissance de sortie, pour le suivi des performances du XCO a été soulignée. Certains résultats de cette étude peuvent avoir des implications directes sur les stratégies de formation, comme l'identification du nombre et de la durée typique des épisodes au-dessus de la PMA ainsi que la potentielle influence du niveau d'expertise les concernant. La conservation de la capacité à enchaîner les accélérations courtes même en fin de course apparaît elle aussi être un trait commun du profil des coureurs de XCO. Les premières données recueillies concernant le type de posture utilisé sont également très intéressantes car elles semblent désigner des catégories d'athlètes qui vont gérer différemment leur effort. Il faut aussi mettre en avant le manque potentiel de pertinence des puissance-mètres dans le suivi de performance lié à sa non-corrélation avec les marqueurs physiologiques. Cela ne veut pas dire qu'ils sont inutiles, mais simplement qu'il faut faire attention à l'interprétation des données enregistrées.

D'autres études seront nécessaires pour mieux comprendre les mécanismes métaboliques et la fatigue musculaire, comme l'étendue des dommages musculaires induits par l'exercice excentrique ou l'impact de la charge de travail mental sur la performance XCO. Enfin, les résultats de cette étude soulignent également la nécessité de stratégies d'entraînement pertinentes pour optimiser la performance et la récupération.

3.3.Synthèse

L'étude des contraintes liées à la pratique moderne du VTT XCO nous a permis de mieux comprendre la dynamique de l'effort et les mécanismes mis en jeu dans cette discipline. Premièrement, il a été montré que lors d'une course, les systèmes aérobie et anaérobie sont sollicités à haut niveau. Leur contribution respective évolue au fil des tours, mais on peut remarquer un investissement plus grand lors du premier tour. Cette différence reflète l'importance stratégique des premiers instants de la course, qui est due notamment au format de départ massif en grille. Il y a donc en particulier une volonté de rapidement se positionner à l'avant après le départ pour éviter de se retrouver bloqué par des concurrents dans des passages étroits et également pour minimiser le risque d'être pris dans une chute (Viana et al., 2018). Par la suite les athlètes gèrent le rythme de course en fonction de leur stratégie et de leur état de forme, mais ils présentent tous ce profil acyclique d'exercice.

A ce sujet, des données supplémentaires ont été recueillies lors de cette étude mais n'apparaissent pas dans cette publication. Il a été demandé aux participants de remplir un questionnaire (adapté de l'échelle de Borg) afin d'évaluer leur investissement, leur état de fatigue, leur niveau de force et leur douleur musculaire. Ils devaient répondre à ce formulaire après chaque tour. Grâce à ces marqueurs, leur ressenti a été relevé tout au long de l'expérimentation. L'investissement était un paramètre de contrôle qui n'a pas montré de variations significatives car ils ont tous annoncé un niveau d'engagement élevé et constant. En revanche, la perte de force, la fatigue et la douleur musculaire ressenties ont toutes les trois été affectées au fil des tours, et corrélées aux effets physiologiques.

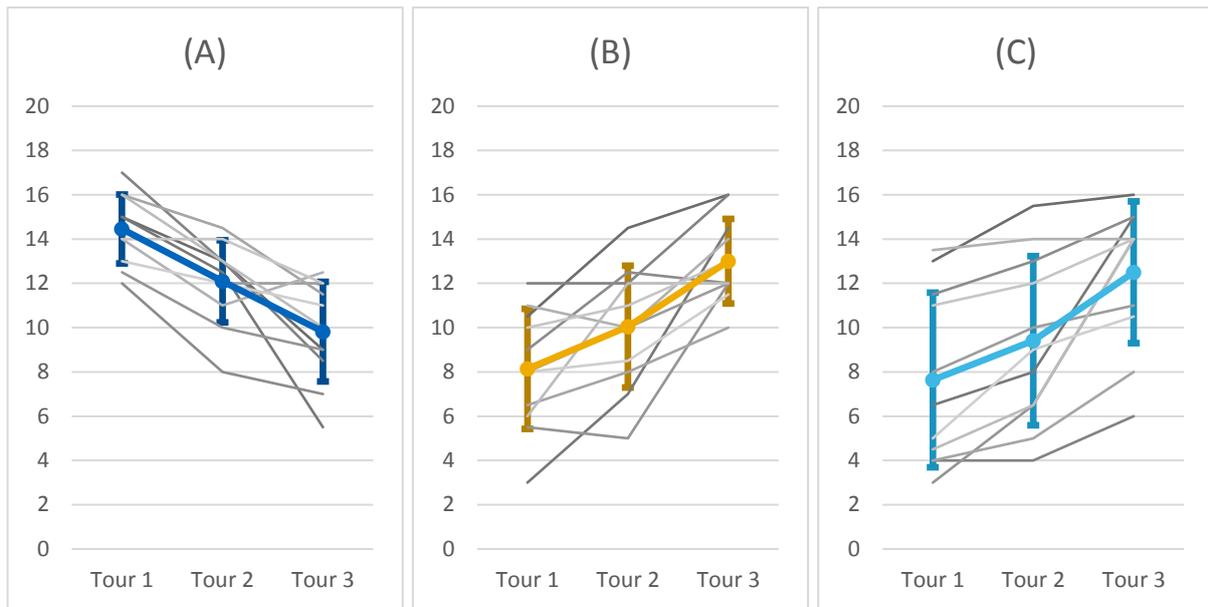


Figure 51. Evolution des paramètres subjectifs relevés après chaque tour grâce à une échelle de 0 à 20. (A : Perte de Force ; B : Fatigue cumulée ; C : Douleur ressentie)

Nous pouvons remarquer que la sensation de perte de force présente une augmentation de l'écart-type entre les coureurs avec les tours, alors que celui-ci diminue avec l'augmentation de la fatigue et de la douleur musculaire ressentie. Il est possible que la perte de force soit variable en fonction des tours, ou bien qu'avec l'effort grandissant et se prolongeant, les coureurs deviennent moins précis au sujet de l'estimation de la force qui leur reste, ce qui pourrait indiquer une perte de lucidité. A l'inverse, ils arriveraient à mieux se situer en termes de fatigue et de douleurs musculaires avec le temps car ils auraient plus de points de repères. Ces variations de la disparité des données pourraient peut-être constituer un moyen de détecter la dégradation du niveau de performance.

En nous intéressant aux phases de hautes intensités, nous avons observé que les périodes passées au-dessus de PMA tendent à être courtes, et oscillent entre 0 et 10 secondes. Ces données suggèrent que le VTT XCO est une discipline ayant un profil intermittent, similaire à certains sports collectifs tels que le basketball. Ces petites phases de surintensité sont en accord avec les observations existantes dans la littérature et rapportées par Baron (2001), qui les situent dans le cadre de certaines phases spécifiques telles que le départ groupé, les montées raides et les dépassements. Le XCO moderne demande aux coureurs de puiser fortement dans leur système tampon pour permettre de maintenir ces efforts de relance au-

delà de PMA. Nous pouvons donc confirmer que le XCO a une part lactique importante dans sa performance et qu'il s'agit là d'une partie déterminante de la réussite, car comme nous venons de le dire, ce sont des phases de courses clefs qui nécessitent ces efforts de très haute intensité. Cela est également en accord avec la corrélation entre les tests lactiques et la performance en VTT observée par Inoue et al. (2012).

Finalement, nous avons montré que les paramètres de terrain classiquement utilisés tels que le rythme cardiaque ou la puissance développée, ne sont pas corrélés avec la demande physiologique du XCO (exprimée en %VO_{2max}). La consommation d'oxygène étant le reflet immédiat de la dépense énergétique et du niveau d'effort, le fait que le rythme cardiaque et la puissance n'y soient pas corrélés peut remettre en question la pertinence de l'utilisation des cardiofréquencemètres et des capteurs de puissance pour les entraînements, qui sont pourtant les outils les plus accessibles et les plus utilisés.

En résumé, nous avons pu valider le fait que le VTT XCO est devenu un sport à la fois acyclique et intermittent, s'éloignant de la représentation de sport d'endurance qu'on lui prêtait par le passé. L'ensemble de la préparation des athlètes doit alors être adapté en conséquence. Certains chercheurs ont ainsi affirmé que l'entraînement en VTT doit être différent de celui en cyclisme de route, et que les tests actuels en laboratoire de prédiction de performance ne sont pas adaptés à cette nouvelle pratique (Prins et al., 2007). Il serait intéressant de développer des techniques de tests spécifiques au XCO, en orientant notamment les diagnostics de performance vers l'étude de la capacité à répéter les efforts très intenses de courte durée (inférieurs à 30 secondes). La mise en lumière de cette nouvelle dynamique des efforts démontre encore un peu plus la spécificité de la discipline du XCO. Ces nouvelles informations vont s'avérer particulièrement utiles concernant l'évaluation et l'entraînement des coureurs. Cela va permettre de mettre en place un travail ciblé sur la filière énergétique anaérobie. Toutefois, les capacités d'endurance pure des athlètes ne sont pas à négliger, car elle constitue la base de la pratique. En effet, l'évolution de la discipline a rendu les épreuves plus rapides mais il s'agit toujours d'un effort long à haute intensité requérant un bon niveau d'endurance. Il a été d'ailleurs observé par Fornasiero *et al.* (2017) que les meilleurs athlètes des catégories jeunes possèdent de hautes valeurs de puissance aérobie, et que cela semble un prérequis pour performer dans les compétitions de XCO.

La physiologie des entraînements est donc destinée à évoluer pour s'adapter au format actuel de la discipline. Cependant, nous avons également été interpellé par un autre point particulier des programmes d'entraînement des équipes de VTT XCO : l'utilisation de matériel de cyclisme sur route. En effet, dans le cadre de longues sessions de travail en foncier (pour faire progresser les capacités physiologiques en endurance) les coureurs utilisent des vélos classiques de route, non pas sur les circuits habituels mais sur des routes ouvertes. Le but recherché est de s'affranchir des perturbations liées au hors-piste pour contrôler plus précisément le niveau de l'effort et travailler de manière plus régulière et sélective dans certaines zones d'intensité. Cependant, cela semble éloigner énormément les coureurs de la nature originelle de l'activité en XCO.

Ces deux disciplines différentes ont déjà fait l'objet d'études comparatives. De manière générale, le profil anthropologique et physiologique des athlètes en cyclisme sur route et tout-terrain a été montré comme étant similaire (Wilber et al., 1997). C'est en particulier avec les « grimpeurs », les spécialistes routiers de la montagne, que les vététistes sont comparables. Ils partagent notamment le besoin d'un rapport poids/puissance élevé (Lee et al., 2002). Cependant, ces études ont été menées avant la modification de la nature de l'activité. Nous pouvons également souligner le fait que la surface d'entraînement diffère clairement entre les disciplines. Par l'intermédiaire d'une étude vibratoire, Macdermid et al. (2015) ont confirmé le fait que le type de sollicitation dépendait du terrain, et que le hors-piste était nettement plus sollicitant.

De plus, certaines recherches ont mis en évidence des différences de mobilité posturale selon l'entraînement en route ou en VTT (Muyor & Zabala, 2016). Comparés aux vététistes, les routiers seraient caractérisés par une plus grande capacité de flexion lombaire, ainsi qu'une bascule antérieure du bassin et une inclinaison du tronc significativement plus prononcée. Pour finir, des différences de technique de pédalage ont été relevées parmi les routiers selon leur niveau d'expertise (García-López et al., 2016). Nous pouvons alors facilement imaginer que des spécialistes de XCO, qui ne sont pas forcément experts en vélo de route, puissent être perturbés dans leur technique (même sans s'en rendre compte).

Compte tenu de la spécificité de chacune des disciplines, nous nous interrogeons alors sur la pertinence de réaliser une partie de la préparation des athlètes dans des conditions différentes de leur situation de compétition, surtout concernant le matériel utilisé et les répercussions potentielles sur la technique de pédalage. Il nous semble donc pertinent d'étudier les cadres utilisés par les coureurs, et plus précisément d'analyser les différences potentielles entre le pédalage avec un modèle route et un modèle tout-terrain.

4. Analyse de la spécificité de la technique de pédalage en XCO

Jusqu'à présent nous avons étudié la performance d'un point de vue plutôt physiologique et surtout centré sur les capacités physiques nécessaires aux athlètes pour faire face aux différents efforts. Cependant la pratique du VTT représente également un contexte d'interaction homme-matériel impliquant de la technologie spécifique à la discipline. Nos précédentes constatations nous ont justement amenés à nous questionner sur le pédalage, en lien avec la spécificité du XCO, et sur la pertinence pour les vététistes d'intégrer du travail avec le vélo de route dans leur plan d'entraînement. La partie 4 se concentre donc sur l'analyse de la technique de pédalage et des effets potentiels liés au matériel utilisé sur son efficacité.

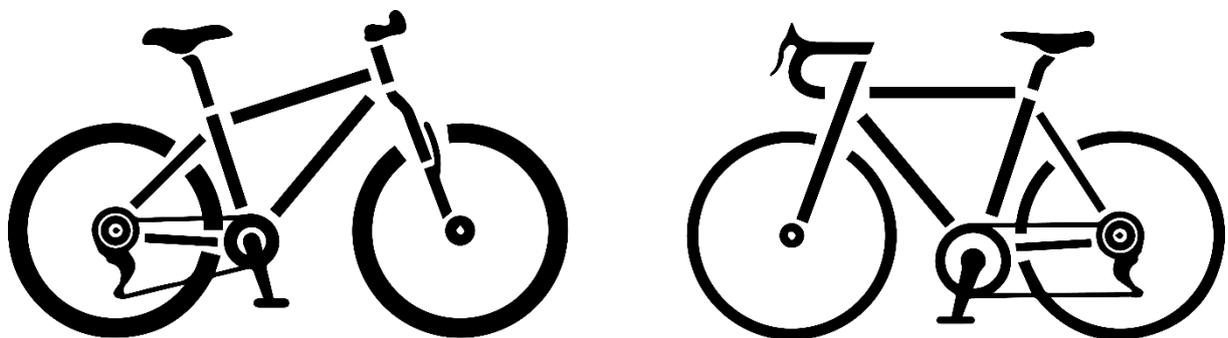


Figure 52. Illustration graphique simplifiée des modèles de vélo de Route (à Droite) et de VTT (à gauche)

4.1. Les déterminants de la qualité de pédalage

Nous avons pu voir précédemment les principaux facteurs biomécaniques de la performance en cyclisme. Nous avons abordé différents éléments tels que l'importance de la posture et des réglages, ainsi que les différentes cadences de pédalage optimales. Mais nous avons surtout présenté le fait que la caractérisation de la technique passe en particulier par l'étude des forces appliquées à la pédale et de leurs orientations.

L'efficacité du pédalage

Le but des athlètes est d'atteindre la meilleure qualité de pédalage possible, et cela passe par une efficacité importante au niveau du pédalage. Celle-ci se définit justement comme étant la capacité à transférer au mieux la force produite, de manière à ce que celle-ci soit motrice au maximum. L'efficacité de la propulsion provient donc de l'orientation de la force appliquée sur la pédale qui doit rester le plus possible perpendiculaire à la manivelle dans le plan sagittal. Dans la littérature, deux indices sont généralement utilisés pour définir cette efficacité. Le premier est l'indice d'efficacité instantané ou *instantaneous index of efficiency* (IIE), décrit par l'équation 7. Il s'agit du ratio entre la force perpendiculaire à la manivelle (force efficace) et la force résultante appliquée à la pédale (force totale), et cela à chaque instant de la rotation (θ).

Équation 7.
$$IIE(\theta) = \frac{F_{efficace}(\theta)}{F_{totale}(\theta)} * 100$$

Le deuxième indice qui est également couramment utilisé est l'indice d'efficacité du pédalage global ou *index of pedalling efficiency* (IE), décrit par l'équation 8. Il représente le pourcentage moyen d'efficacité sur un tour (Lafortune & Cavanagh, 1983).

Équation 8.
$$IE = \frac{\int_0^{2\pi} F_{efficace}(\theta)}{\int_0^{2\pi} F_{totale}(\theta)} * 100$$

Les études existantes s'intéressant à la qualité de pédalage ont montré que cet indice a tendance à augmenter avec les puissances plus importantes et à diminuer avec la cadence pour une puissance donnée (Ericson & Nisell, 1988; Patterson & Moreno, 1990; Coyle et al., 1991; Kautz et al., 1991). En effet, avec l'augmentation de la rapidité du mouvement, il semble naturel

que l'orientation correcte des forces aux pédales soit plus complexe, et il semble logique que la demande d'un effort plus important requiert d'être plus appliqué.

La plupart des études ont décrit une efficacité globale mais il est important de s'intéresser plus en détail à ce paramètre et à son évolution au cours du cycle. Dans leur étude, Rossato et al (2008) ont par exemple divisé le cycle en deux phases distinctes (propulsion et récupération) et ont calculé les IE séparément. Ils ont pu montrer que les cadences plus basses permettent une plus grande efficacité lors de la phase de récupération (ou phase arrière), localisée entre 180° et 360° de rotation (Tableau 3).

n = 8	W _{60%}			W _{80%}		
	FCC - 20%	FCC	FCC + 20%	FCC - 20%	FCC	FCC + 20%
IE (%)	57 ± 5	58 ± 5	54 ± 4	59 ± 7	61 ± 5	61 ± 5 ^f
IE _{PROP.} (%)	74 ± 4	81 ± 4 ^c	78 ± 5	71 ± 7	77 ± 4 ^a	79 ± 3 ^b
IE _{REC.} (%)	6 ± 12	3 ± 4	0	10 ± 10	11 ± 25	5 ± 10

^a p < 0.05 between FCC - 20% and FCC; ^b p < 0.05 between FCC - 20% and FCC + 20%; ^c p < 0.05 between FCC + 20% and FCC; ^f p < 0.05 between FCC + 20% W_{60%} and FCC + 20% W_{80%}

Tableau 5. Evolution des IE selon la cadence dans deux conditions de puissance et selon plusieurs cadences (60 et 80%_{PMA}; FCC = *Freely Chosen Cadency*) (d'après Rossato et al, 2008)

Cependant il serait incorrect de qualifier cette portion du cycle de « passive » car, bien que ce ne soit pas la partie la plus importante en terme de production de force motrice, c'est bien la partie où la production de force est la plus affectée par les modifications d'intensité, comme le démontre l'étude de Zameziati et al (2006) (figure 37).

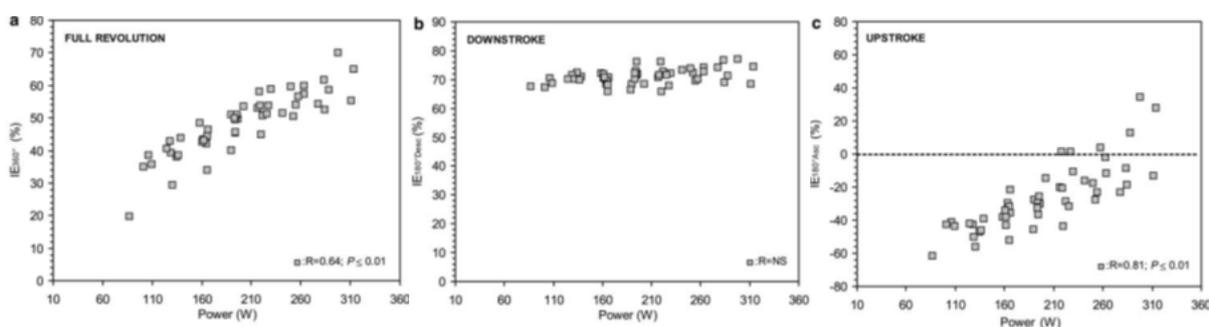


Figure 53. Relation entre l'IE et la puissance : a) Pour l'ensemble du cycle ; b) lors de la phase de descente ; c) lors de la phase de remontée (d'après Zameziati et al, 2006)

Dans le cadre de l'entraînement en XCO, nous avons pu évoquer le fait que les athlètes n'utilisent pas que leur cadre de VTT, mais ils ont également un cadre de vélo de route afin de réaliser des séances de travail longues à intensité stable et maîtrisée, et donc en

s'affranchissant des irrégularités du terrain hors-piste habituel. Ce genre de séances représente une part variable de la charge de travail selon les planifications d'entraînement, mais elles sont systématiques et incarnent un aspect non-négligeable de la préparation globale des coureurs.

Nous nous sommes donc interrogés au sujet de l'utilisation par les vététistes d'un matériel venant d'une autre spécialité cycliste, notamment car les recherches scientifiques ont montré dans certains cas que le matériel pouvait avoir un effet sur les paramètres du pédalage. La comparaison de plusieurs modèles de VTT ayant des systèmes de suspension différents a par exemple montré que sur une piste bosselée, un cadre tout-suspendu permet de réduire le coût énergétique, le rythme cardiaque et le niveau d'effort perçu comparé à un cadre semi-rigide (Titlestad et al., 2006). Cependant, ce sont les effets du matériel sur le pédalage qui nous intéressent. Dans ce domaine, de nombreuses investigations ont porté sur les réglages des machines et, par conséquent, la position de pilotage du coureur. Il a notamment été constaté que le déplacement de la selle d'un centimètre par rapport au réglage habituel d'un coureur (peu importe la direction) pouvait faire varier l'IE de 2 à 7% (Diefenthaler et al., 2006) et que de tels décalages avaient une influence sur l'inconfort (Verma et al., 2016). Une assise plus reculée offrirait un avantage en terme d'efficacité de pédalage par rapport à une position plus avancée (Menard et al., 2016). Mais il n'y a pas que la position de la selle, les réglages sont multiples et peuvent mener à différentes postures de pilotage. Dans leur étude, Dorel et al. (2009) montrent que la position aérodynamique entraîne une perte d'efficacité de 9.5% lors de la phase arrière du pédalage comparé à une position buste droit (figure 48).

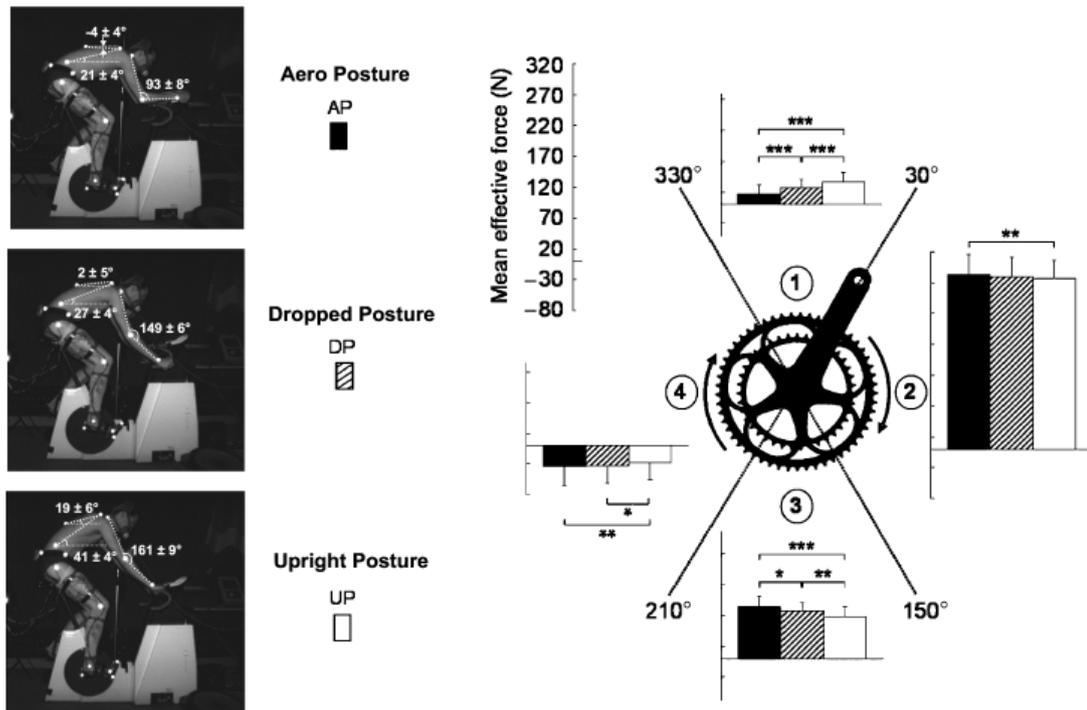


Figure 54. Valeurs moyennes de la force effective calculées pour quatre secteurs angulaires en fonction de la position de la manivelle sur l'ensemble du cycle dans les trois configurations de corps. (d'après Dorel et al, 2009)

Malgré une littérature fournie sur les relations entre la technique de pédalage et la technologie utilisée (ou ses réglages), l'influence comparée du matériel de différentes disciplines sur la qualité de pédalage n'a fait l'objet d'aucune recherche. Nous nous sommes donc intéressés au pattern d'application des forces selon le type de cadre utilisé.

La mesure des forces

Pour mesurer les efforts appliqués aux pédales, plusieurs types d'outils existent avec des caractéristiques différentes pour des utilisations adaptées au laboratoire ou au terrain. La démocratisation de la technologie a permis le développement d'outils embarqués tels que les capteurs de puissance. Ces dispositifs se présentent sous la forme de pédales, ou plus souvent de manivelles instrumentées, qui utilisent des jauges de contraintes pour calculer un couple permettant de monitorer en direct la puissance produite par le cycliste (voir figure 39). A l'instar d'un cardiofréquencemètre, renseignant le rythme cardiaque, ces capteurs de puissance peuvent se révéler utiles à la fois dans le but de récolter des données et analyser la performance ultérieurement mais aussi en temps qu'outils d'entraînement. L'athlète peut alors choisir de travailler avec précision dans des zones spécifiques d'intensité par exemple. Cela lui permet

également de suivre sa progression au cours de la saison et d'avoir un retour objectif sur la performance. D'ailleurs, travailler avec la puissance, qui est un paramètre mécanique, semble plus pertinent que de suivre l'évolution de la fréquence cardiaque qui est soumise à certains facteurs d'influence externes (température, fatigue, hydratation, stress, ...) et une inertie naturelle. Cependant lors des phases de non-pédalage il n'y aura aucune information enregistrée car la vitesse angulaire est un élément nécessaire pour le calcul de la puissance.



Figure 55. Illustration d'un pédalier instrumenté de la marque SRM avec en loupe une de ses jauges de contraintes (@SRM.de)

Ce genre d'outils permet de donner quelques informations générales afin d'ajuster au mieux un programme d'entraînement pour un athlète et de développer ses capacités de manière optimale. Mais ces pédaliers instrumentés restent limités et ne permettent pas de mesurer correctement les forces appliquées. Pour évaluer l'effort de manière scientifique, il existe du matériel de laboratoire présentant plus de contraintes (encombrement, fragilité,..) mais offrant la possibilité de réaliser des acquisitions de données fiables et précises. Parmi ces solutions on peut trouver par exemple le système de mesure I-Crankset de la société SENSIX qui se présente sous la forme de pédales instrumentées (figure 51). Comme le précise le fabricant : « cet outil offre la possibilité de mesurer tous les efforts produits par le cycliste grâce à un capteur six composantes (figure 50) intégré sous la cale automatique d'une pédale de vélo (capteur adaptable à tout type de cale automatique) ». En utilisant ce système, on mesure les composantes de la force dans les trois dimensions et on peut alors accéder au patron des forces appliquées à la pédale, et aussi calculer d'autres indices intéressants dans l'étude du geste, comme par exemple le pic de force et l'angle de poussée correspondant.

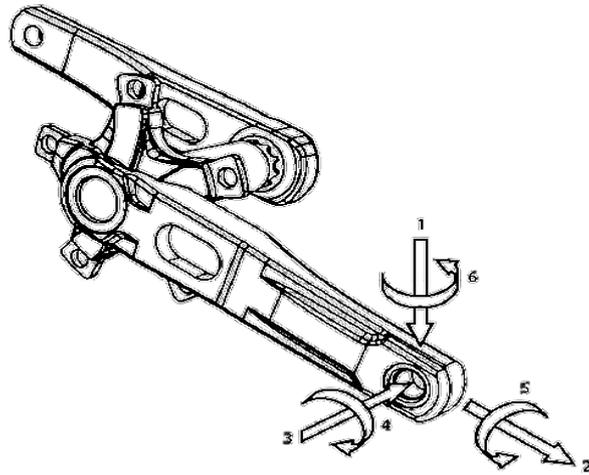


Figure 56. Illustration des 6 composantes qu'il est possible de déterminer à partir des pédales instrumentées (3 forces et 3 moments)



Figure 57. Photographie de pédales instrumentées de laboratoire (*@I-Crankset, Sensix*)

4.2. Etude de l'influence du type de cadre (Route/VTT) sur la technique en VTT

4.2.1. Cadre de l'expérimentation

Pour cette étude, nous avons souhaité mettre en place un protocole nous permettant de mesurer et de comparer la qualité du pédalage selon le type de cadre utilisé. Nous avons donc recruté un groupe de dix athlètes pratiquant le XCO au niveau national afin d'analyser leur pédalage sur des cadres de vélo de route et de VTT. Nous avons utilisé un ergocycle paramétrable pour maîtriser l'intensité de l'effort imposé aux sujets, ainsi que des pédales instrumentées pour recueillir notamment les données de forces en trois dimensions appliquées

aux pédales. Nous avons également pris soin de relever l'ensemble des mesures standards de la machine et de la position de pilotage afin de pouvoir comparer les cadres et les réglages. Afin d'essayer de dénaturer le moins possible la technique de chaque participant, il leur a été demandé d'utiliser leurs cadres personnels.

La tâche a été de réaliser des sessions de pédalage d'une minute avec les deux types de cadre. Grâce aux données de force, nous avons déterminé les efficacités de pédalage instantanée et moyennée pour chaque rotation. Compte tenu de l'influence de la cadence et de la puissance sur le pédalage, nous avons demandé aux sujets de choisir librement une fréquence de pédalage et de la conserver stable, mais nous avons également souhaité observer le comportement des sujets à trois niveaux d'intensité différents.

4.2.2. Article scientifique : Changer le cadre de vélo influence-t-il le patron d'application des forces à la pédale des cyclistes de VTT XCO ?

Titre original de l'article: *Does changing the bike frame influence pedal force pattern in mountain bike cyclists?*

État : Accepté le 5 Décembre 2018, dans la revue scientifique : *Science & Sports*



Disponible en ligne sur

ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

EM|consulte
www.em-consulte.com



ORIGINAL ARTICLE

Does changing the bike frame influence pedal force pattern in mountain bike cyclists?

Le type de cadre de vélo influence-t-il le patron d'application des forces des vététistes ?

S. Devys*, D. Bertin, G. Rao

CNRS, Institut des sciences du mouvement Étienne-Jules Marey, Aix-Marseille université, 910 Marseille, France

Received 2 October 2018; accepted 5 December 2018

KEYWORDS

Pedalling efficiency;
Performance;
Cycling
biomechanics;
Mountain bike

Summary

Objectives. – In cycling, the interaction between the athlete and his bike is crucial for the resulting performance with frame geometry and bike-setup being known to affect the biomechanical and physiological outputs. Road and Olympic cross-country (XCO) bike frames are routinely used in training programs, despite having different frame configurations. The present study compared biomechanical indices of the pedalling techniques between road and off-road bike frames.

Equipment and methods. – Ten XCO mountain bikers of national level performed two sessions on their personal bikes. For each frame, the athletes achieved one-minute tests at 65%, 90% and 115% of their maximal aerobic power (MAP) while recording 3D pedal forces. Together with various frame and bike-setup measurements, the peak of effective force, corresponding crank angle, global and instantaneous index of efficiency were compared for Power and Frame statistical effect.

Results. – The frame geometry and bike-setup showed significant differences between the road and XCO frames. The Power factor significantly ($P < 0.05$) influenced the biomechanical indices of pedalling technique, but no effect of the Frame on any variable was reported. We posit that an internal reorganization was adopted by each cyclist to retrieve a specific and individual pedalling pattern regardless of the frame type. Such results can have important implications for training.

© 2019 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

* Corresponding author.

E-mail address: simon.devys@univ-amu.fr (S. Devys).

<https://doi.org/10.1016/j.scispo.2018.12.006>

0765-1597/© 2019 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Please cite this article in press as: Devys S, et al. Does changing the bike frame influence pedal force pattern in mountain bike cyclists? Sci sports (2019), <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2018.12.006>

MOTS CLÉS

Efficacité de pédalage ;
Performance ;
Biomécanique du cyclisme ;
Vélo tout-terrain

Résumé

Objectifs. – En cyclisme, l'interaction entre l'athlète et son vélo est cruciale pour la performance, la géométrie du cadre et la configuration du vélo étant connues pour affecter les résultats biomécaniques et physiologiques. Les cadres de vélo de route et de cross-country olympique (XCO) sont couramment utilisés dans les programmes d'entraînement, malgré des configurations de cadres différentes. La présente étude a comparé les indices biomécaniques des techniques de pédalage entre les cadres de vélo de route et de vélo tout-terrain.

Matériels et méthodes. – Dix Vététistes XCO de niveau national ont effectué deux séances sur leur vélos personnels. Pour chaque cadre, les athlètes ont réalisé des tests d'une minute à 65 %, 90 % et 115 % de leur puissance aérobique maximale (PMA) tandis que les forces 3D aux pédales étaient enregistrées. En plus des diverses mesures du cadre et de la configuration du vélo, le pic de force effective, l'angle de manivelle correspondant, l'indice global et instantané d'efficacité ont été comparés en observant les effets statistiques de la puissance et du cadre.

Résultats. – La géométrie du cadre et la configuration du vélo ont montré des différences significatives entre le cadre de route et le cadre XCO. Le facteur de puissance ($n < 0,05$) a influencé de façon significative les indices biomécaniques de la technique de pédalage, mais aucun effet du cadre n'a été rapporté, sur aucune variable. Nous supposons qu'une réorganisation interne a été adoptée par chaque cycliste pour retrouver un modèle de pédalage spécifique et individuel quel que soit le type de cadre. De tels résultats peuvent avoir des implications importantes pour l'entraînement.

© 2019 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

1. Introduction

Olympic Cross-Country mountain-biking (XCO) is a sporting discipline that requires extensive physical [1] and technical [2,3] qualities in order to perform at the highest level. It is also a sport in which equipment stands as an important factor and where the concept of optimising the man-machine interaction is essential. With the aim of characterising performance parameters, previous research on XCO has focused on the influence that frame geometry and bike-setup may have on pedalling technique parameters [4–6]. For instance, it has been shown that changes of seat position induce a larger discomfort over time for upward and backward positions compared with neutral posture [7]. Compared to other cycling disciplines [8–10], XCO riders have a lower loss of developed power than road cyclists and even less than sprinters (respectively 6.4 W/s vs. 7.9 W/s vs. 13.3 W/s) during a 30s sprint test, which points to the specific nature of each discipline [11]. Despite a large literature on the study of pedalling, it appears that the physical abilities were studied in comparing different disciplines, but few analyses have been performed regarding the influence of the discipline-specific equipment on the performance.

To analyse the cycling performance, some studies have focused on joint kinematics [12] or muscle activation patterns [13,14] as features giving rise to the power output, but most of them have observed the mechanical indices representative of the pedalling technique as these indices represent the actual mechanical output the athlete is producing to achieve its performance. The most commonly used

parameter is the pedalling index of efficiency (IE) [15,16]. This index of efficiency illustrates the athlete's capacity to correctly orient the applied force perpendicularly to the crank to optimise effective power generation [17]. In their review on the subject, Bini et al. [18] state that improvement of force effectiveness can increase power output. Many factors can influence the IE, primarily power output and pedalling cadence. The IE increases with the rise in the required relative power [19–21] and decreases with pedalling cadence [22,23]. For example, Sanderson [2] reported that the change from 100 W to 235 W increased IE by approximately 20%. The strong influence of equipment on cycling performance was also highlighted, especially with regard to the forces transferred to the pedals [24]. In particular, it was observed that changes of $\pm 3\%$ of the preferred saddle height (corresponding to $\pm 10^\circ$ knee flexion), irrespective of direction, could lead to a variation in the IE from 2% to 6% [25]. Bike-setup also affects the upper body position and a recent study demonstrated a loss of efficiency of 9.5% during the rear phase of pedalling whilst in aerodynamic position, compared to a classic position (upper body upright) [26].

In the majority of XCO riders' training programmes, long-lasting road bikes sessions are included in order to focus on the physiological and pedalling techniques aspects without the off-road piloting overload. Given the specific nature of each discipline (road vs. XCO), unexpected effects on the pedalling technique could arise due to the modification of bike-setup, geometry, or mechanical characteristics.

The aim of this study was to compare the influence of bike frame, considering both bike-setup and frame

Please cite this article in press as: Devys S, et al. Does changing the bike frame influence pedal force pattern in mountain bike cyclists? Sci sports (2019), <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2018.12.006>

112 geometry, on biomechanical characteristics of pedalling.
113 More precisely, the present study observed mechanical
114 indices related to pedalling efficiency of XCO athletes
115 during a session comparing a road bike frame and a
116 mountain bike frame. Considering the reported influence
117 of bike-setup and bike features on performance
118 [7,26,27], our hypothesis was that the resulting pedalling
119 pattern would be different between the two bike frame
120 types.

121 2. Materials and methods

122 2.1. Subjects

123 In order to ensure homogenous participant features, we
124 choose to control for the gender, age range, practice level
125 and chaining types (circular). The combination of these
126 criteria (especially the practice level and chaining types)
127 largely restrain the available population of participants. A
128 total of 10 mountain bikers riding at amateur level with
129 performance in national level competitions took part in
130 this study (age: 18.8 ± 2.2 years; height: 177.3 ± 5.4 cm;
131 weight: 64.9 ± 3.9 kg). The participants were predominantly
132 involved in competitive mountain-biking activities and spent
133 at least 80% of their training sessions on a mountain bike.
134 The study protocol complied with the standards established
135 in the Helsinki declaration and all the procedures have been
136 approved by the sport sciences department ethics committee.
137

138 2.2. Frames analysis

139 At first, it was necessary to check if the two frame types
140 selected were indeed different. Ten measurements of frame
141 geometry were registered in order to compare the structures:
142 angles of seat tube and head tube; length of top
143 tube, seat tube, head tube, wheelbase, chainstay, reach,
144 and stack; and bottom bracket drop (Fig. 1). Three measurements
145 reflecting the bike-setup and parameters that may influence
146 pedalling indices were recorded [28,29]: the saddle height
147 from the centre of the seat, above the saddle tube, to the
148 crank-centre; the horizontal length from the centre of the
149 saddle to the handlebars and the vertical drop between the
150 saddle and handlebar (Fig. 1).

151 2.3. Protocol

152 During the days prior to the experiment, each of the participants
153 followed a discontinued incremental test protocol on a bicycle
154 ergometer (Lode Excalibur Sport, Groningen, Netherlands)
155 in order to determine their maximal aerobic power (MAP). In a
156 previous study, it was state than the ventilatory parameters
157 showed similar responses between continuous vs. intermittent
158 protocol on that same bicycle ergometer [30]. The choice of a
159 discontinued protocol was made to propose an effort as similar
160 as possible to the real XCO practice [1]. After a 5-minute
161 warm-up at 100 Watts, the imposed power was increased by
162 30 Watts every 2 minutes [9]. Each stage was followed by a
163 30-second recovery period [31]. The MAP was defined as
164 being the power

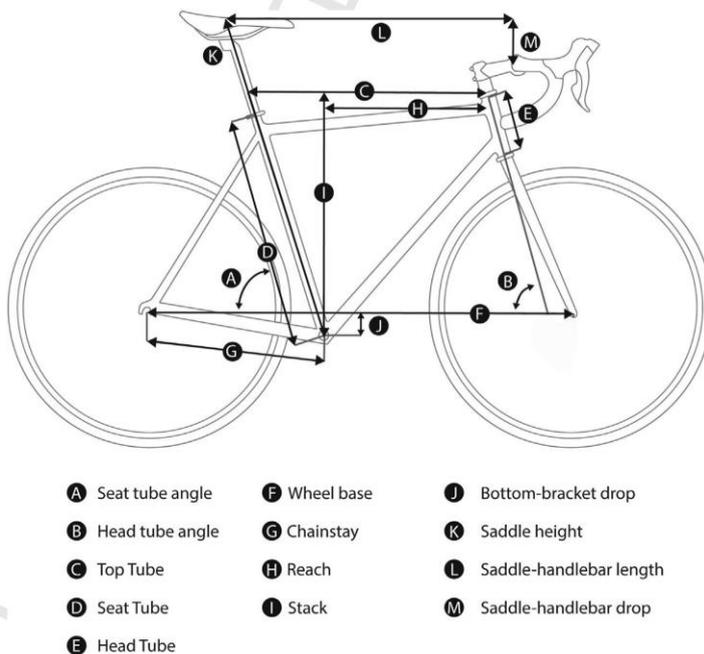


Figure 1 Measurements for comparison of frame geometry and bike-setup.

Please cite this article in press as: Devys S, et al. Does changing the bike frame influence pedal force pattern in mountain bike cyclists? Sci sports (2019), <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2018.12.006>

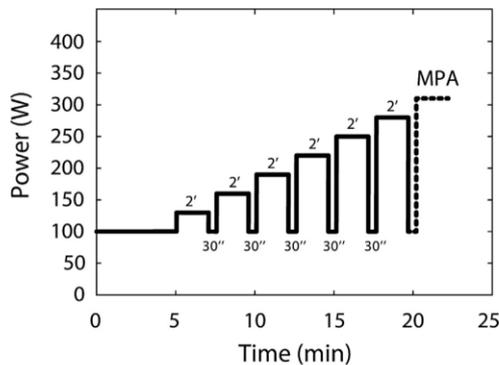


Figure 2 Chronology of the discontinued incremental test for determining the maximal aerobic power (MAP).

maintained for more than one minute during the last stage reached before exhaustion (Fig. 2).

The experimental phase involved carrying out a pedalling session on a bicycle ergometer equipped with power control (Cyclus2, RBM Electronics, Leipzig, Germany). The workload measurements between the two different ergocycles (Lode and Cyclus) were studied by Reiser et al. [32] who reported very minor differences. In addition, we have used a specific model of Cyclus engine (Sprint) which has been developed to be more reliable than the classic one at high power combined with low cadences. Each rider was instructed to bring his own frames, a road bicycle (with rigid frame) and a mountain bike (with semi-rigid frame) in order to use personal equipment suitably adapted with regard to bike-setup. The suspension systems on the mountain bikes were blocked and it was requested to adopt the same type of grip on the two handlebars.

A standardised warm-up was carried out before the start of the session and also after the change of frame. This warm-up consisted of 6 minutes pedalling at 60% MAP then 3 blocks of 30 seconds at 100% MAP with a one-minute of recovery at 100 W between each block. For the test phase, the participants carried out pedalling sessions that lasted one minute in three different power conditions, for each frame. The three power levels chosen were 65%, 90% and 115% of MAP as reflecting the distribution of effort intensity during XCO mountain bike races [33]. For each condition, two consecutive trials were carried out and only the second one was retained for analysis. All data were recorded during that second period. A recovery phase of one minute was conducted at the end of the 65%_{MAP} and 90%_{MAP} tests; and 3 minutes after the tests at 115%_{MAP}. For all the tests, the pedalling frequency was freely selected by the participants, but they were instructed to maintain the frequency at an identical level throughout all the tests. The order of presentation of the different experimental conditions was randomised for both the frames (XCO or road) and power levels (65%, 90% or 115% of MAP), rendering a total of 6 experimental conditions.

During each test, the 3D forces applied to the pedals were recorded at 250 Hz by an instrumented pedal system coupled with optical coders that measure the orientation of

the pedal relative to the crank (I-Crankset, Sensix, Poitiers, France). The spatial 3D position of the right pedal axle was also measured (at 200 Hz) by a camera system with active markers (Codamotion, Charnwood Dynamics Ltd, Leicestershire, England) to further break down the pedalling cycles. The starting point of the cycle is defined by the highest position of the pedal. The synchronisation of these two acquisition tools was performed by the Codamotion system that triggered the force recording through an analog TTL signal, because of the separated data storage and sampling rate, an off-line processing consisting in a numerical interpolation was then performed. Due to the cyclical and highly reproducible nature of the kinematics data of the pedal axle trajectory, this variable was oversampled from 200 to 250 Hz using MATLAB custom scripts (MATLAB Release 2015b, The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, United States).

2.4. Data analysis

The forces recorded at the pedals were recomputed within the reference frame of the cranks using the data from the coders. Each cycle was then broken down, using the highest position of the pedal marker as a starting point and time-normalised over 360 points. For each revolution, the angles of the crank corresponding to the maximal effective force were evaluated as well as the related peak of effective force, normalized to the weight of the subjects. The mechanical pedalling efficiency was computed using the instantaneous index of efficiency (IIE, eq. 1). To get an overall efficiency index during a pedalling cycle, we also defined the pedalling index of efficiency (IE, eq. 2). The indices IIE and IE were originally described by Sanderson et al. [2] and Lafortune and Cavanagh [15], respectively.

$$IIE(\theta) = \frac{F_{eff}(\theta)}{F_{tot}(\theta)} \times 100 \quad (1)$$

$$IE = \frac{\int_0^{2\pi} F_{eff}(\theta) d\theta}{\int_0^{2\pi} F_{tot}(\theta) d\theta} \times 100 \quad (2)$$

In which θ is the crank angle, F_{eff} is the effective force (force perpendicular to the crank) and F_{tot} is the resulting 3D force.

2.5. Statistical analysis

Student's *t*-test were performed in order to test the influence of frame types on bike geometry and bike-setup variables. Two-factor analysis of variance (Anova) with repeated measures were conducted to test the influence of frame types and power levels on the following variables: peak of effective force, crank angle of peak of effective force and IE. These statistics were conducted using the R software (R Core Team, 2013). The significance level was set at $P=0.05$ for all the statistical tests. HSD-Tukey post-hoc tests were conducted whenever necessary.

The Statistical Parametric Mapping (SPM) procedure [34] was used to determine the potential statistical differences between bike frames and power levels on crank force

Please cite this article in press as: Devys S, et al. Does changing the bike frame influence pedal force pattern in mountain bike cyclists? Sci sports (2019), <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2018.12.006>

Q12 Table 1 Summary of *t*-tests comparison for mountain bike (MTB) and road frames.

	#	Variables	MTB	Road
Frame Geometry	A	Seat tube angle (°)	73.3 ± 0.3	73.8 ± 0.9
	B	Head tube angle (°) ^a	70.4 ± 0.8	72.9 ± 0.4
	C	Top tube (cm) ^a	59.9 ± 0.9	54.5 ± 0.9
	D	Seat tube (cm) ^a	44.1 ± 1.4	50.6 ± 2.2
	E	Head tube (cm) ^a	10.3 ± 0.4	14.3 ± 1.5
	F	Wheel base (cm) ^a	108.9 ± 1.4	97.9 ± 0.8
	G	Chainstay (cm) ^a	43.2 ± 0.6	40.5 ± 0.2
	H	Reach (cm) ^a	41.5 ± 1.0	38.7 ± 0.9
	I	Stack (cm) ^a	61.3 ± 0.8	54.2 ± 1.6
	J	Bottom bracket drop (cm) ^a	6.2 ± 0.3	6.9 ± 0.2
Bike-Setup	K	Saddle height (cm)	75.3 ± 3.7	76.4 ± 5.6
	L	Saddle-handlebar length (cm)	69.4 ± 3.0	68.9 ± 3.5
	M	Saddle-handlebar drop (cm) ^b	5.8 ± 4.4	9.7 ± 3.7

Average ± SD over all the participants; MTB ≠ Road.

^a *p* < 0.01.

^b *p* < 0.05.

260 outputs. The use of SPM is appropriate if the hypothesis
261 is "non-directed", if an effect of power or bike frame
262 over the whole cycle and not at specific time instant is
263 expected. When the test statistic field exceeded the critical
264 test statistic threshold, a significant effect was observed
265 at the corresponding time period. The greater the test
266 statistic field exceeds the critical test statistic threshold,
267 the more the effect was significant. The SPM was per-
268 formed from the MATLAB open-source spm1d code (M.0.4.3,
269 www.spm1d.org) where two-way Anova repeated measures
270 evaluated ($\alpha=0.05$) the main effects of the "bike frame"
271 and "power level" factors and the interaction between
272 these factors on the IIE waveforms.

273 3. Results

274 In terms of geometry, all the investigated parameters were
275 significantly different (all *P* < 0.05), besides the seat tube
276 angle. Taken as a whole, the MTB frame induced higher han-
277 dlebars relative to the ground than the Road one. The results
278 of the bike-setup values did not display a difference neither
279 for the distance between the saddle and the crank-center,
280 nor for the saddle to the handlebars distance. A significant
281 difference (*P* < 0.05) was found between the frames regard-
282 ing the vertical drop between the saddle and the handlebars
283 (Variable M on the Fig. 1) (Table 1).

The averaged maximal aerobic power of the participants
was 373.0 ± 38.6 Watts and the cadence (stable throughout
the tests) was 93.8 ± 3.2 rpm.

Significant differences (*P* < 0.01) existed between all the
power conditions for the peak force and IE parameters, but
no difference appeared concerning the crank angle of peak
of effective force (Table 2). Conversely, the Anova analysis
did not show any significant effect of the bike frame fac-
tor on all the investigated parameters. No interaction was
highlighted between the type of frame and the power levels
(Fig. 3).

The SPM analysis showed no frame type effect on IIE.
However, a significant difference located in the second part
of the cycle appeared due to the power levels (Fig. 4).

298 4. Discussion

299 In this study, we sought to determine whether the biome-
300 mechanical characteristics of pedalling (mechanical indices
301 related to the force exerted at the pedal and crank levels)
302 were similar or not depending on the type of bicycle frame
303 used (road or mountain bike). We reported differences in the
304 bike geometries, bike-setup as well as a significant influence
305 of the power factor for all the parameters (except for the
306 crank angle of peak of effective force) but did not observe

Table 2 Summary of analysis of variance (Anova) comparisons for mountain bike (MTB) and road frames and for the different intensity (%MPA) conditions.

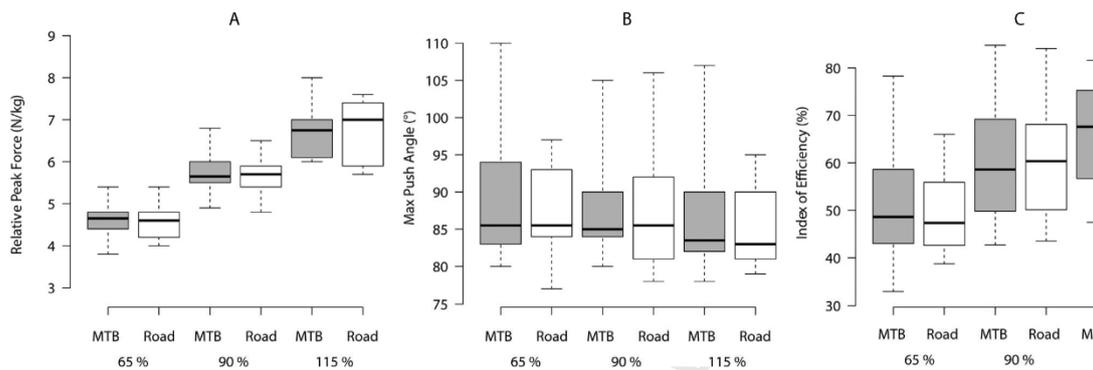
Variable	MTB 65%	Road 65%	MTB 90%	Road 90%	MTB 115%	Road 115%
Relative peak force (N/kg) ^{a,b,c}	4.6 ± 0.5	4.6 ± 0.5	5.7 ± 0.5	5.7 ± 0.5	6.7 ± 0.6	6.7 ± 0.6
Max push angle (°)	89.1 ± 9.4	87.9 ± 6.4	88.1 ± 7.3	88.0 ± 8.9	86.9 ± 8.3	85.7 ± 5.7
Index of efficiency ^{a,b,c}	50.7 ± 13.2	49.5 ± 9.1	60.0 ± 13.0	60.6 ± 13.2	65.9 ± 11.9	66.3 ± 11.5

^a Significant difference between 65% and 90%.

^b Significant difference between 65% and 115%.

^c Significant difference between 90% and 115%.

Please cite this article in press as: Devys S, et al. Does changing the bike frame influence pedal force pattern in mountain bike cyclists? Sci sports (2019), <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2018.12.006>



Q11 **Figure 3** Boxplot diagrams depicting (A) the normalized peak force, (B) the crank angle of peak of effective force and (C) the index of efficiency (IE) under the different conditions (average \pm SD over all the subjects).

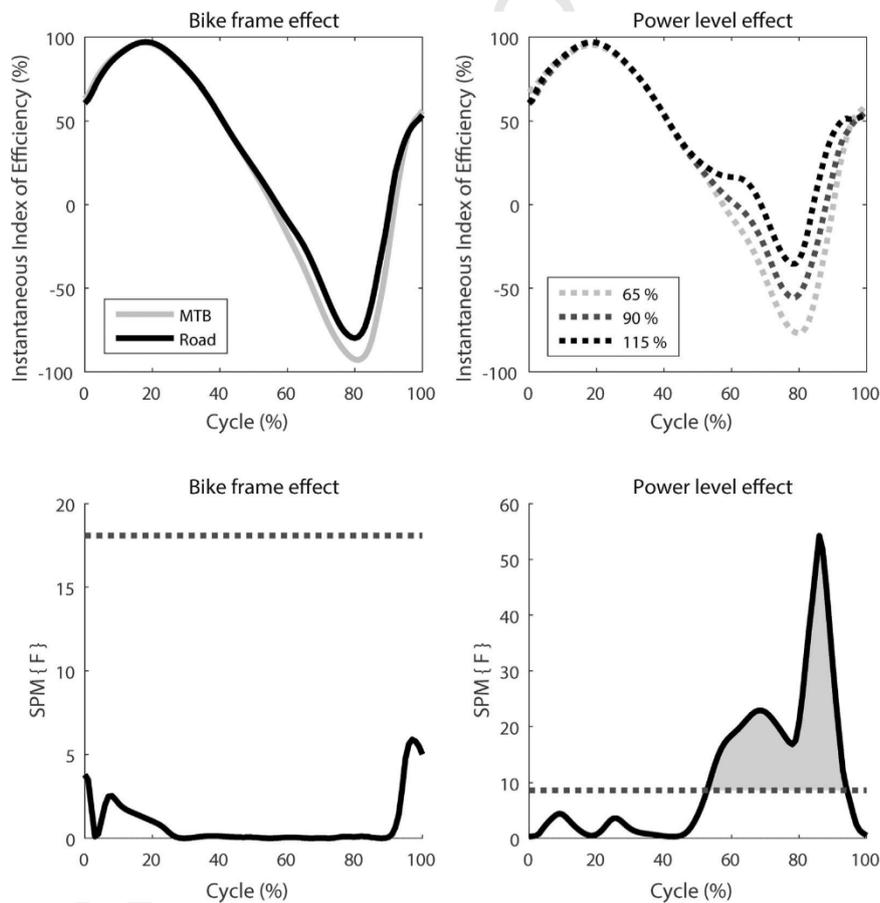


Figure 4 Results of statistical parametric mapping (SPM) analysing bike frame and power effects. No significant interaction was reported. The absence of a significant effect of the frame on the instantaneous index of efficiency (IIE) can be noted as well as a strong effect of relative power, particularly on the lift up phase of the cycle (shaded grey area between 55% and 95% of the crank cycle).

Please cite this article in press as: Devys S, et al. Does changing the bike frame influence pedal force pattern in mountain bike cyclists? Sci sports (2019), <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2018.12.006>

307 significant difference concerning the influence of the frame
308 type on the mechanical outputs.

309 Kautz et al. [20] demonstrated, for example, that with
310 an increase in power, the subjects applied greater normal
311 force to the pedal during the push phase. Our results showed
312 a modification in the peak force (Fig. 3A), which changed
313 in a similar upward manner as the requested power output
314 (4.6 ± 0.4 N/kg at 65%_{MAP} vs. 5.7 ± 0.5 N/kg at 90%_{MAP} vs.
315 6.7 ± 0.6 N/kg at 115%_{MAP}). Bini and Diefenthaler [12] also
316 showed that for an identical pedalling pattern the power
317 output can be improved by an increase in the force applied
318 on the pedal. However, our results showed that although
319 a variation in peak force depending on the power levels
320 do exist, the crank angle at which the peak appears is not
321 affected (Fig. 3B). We therefore confirmed that an adapta-
322 tion of the pedalling action occurred, but within a pattern
323 that remains identical. Greater force is applied in order
324 to produce the extra crank torque required for the higher
325 power conditions as well as less resistive torque during the
326 backstroke phase (Fig. 4 and [26]), but within a general
327 pattern that is similar for the propulsive torque part.

328 It has been shown that the efficiency of force application
329 on the pedal is improved at higher power levels [18]. Our
330 results reinforce this point, whether for IE (Fig. 3C) or for
331 IIE. Of interest is the analysis of the pedalling efficiency at
332 each crank angle of the cycle. Indeed, our results on the IIE
333 showed an improvement of the mechanical efficiency during
334 the backstroke phase of the cycle (53 to 94%_{Cycle}) for high
335 power levels (Fig. 4), which is consistent with the obser-
336 vations of Sanderson [2] but extends the sharpness of the
337 analysis thanks to the SPM use.

338 Unlike studies in current literature, the use of the ath-
339 lete's personal frames allowed to assert that we analyse an
340 effect obtained after a long period of habituation and not an
341 acute effect due to a sudden change of equipment. Within
342 the scope of our analysis on the influence of the bicycle
343 frame used, no statistical effect was observed for any of the
344 variables investigated (Table 2). This seems to indicate that
345 the athletes specialised in the XCO discipline have a pattern
346 of force application exerted on the cranks identical irre-
347 spective of the (usual) equipment they use. The comparison
348 of the saddle height and saddle-handlebar distances rein-
349 forces this point as there is no difference depending on the
350 frame chosen (Table 1). However, the vertical drop between
351 saddle and handlebars is significantly more pronounced on
352 road bicycles, which implies a more upright posture with
353 MTB frame. This posture variation is reinforced by the dif-
354 ference of geometry parameters between frames (Table 1)
355 and particularly the fact that the stack height (variable I in
356 Fig. 1) is higher with MTB frames. In all likelihood, all these
357 elements lead to a modification on the orientation of the
358 torso and consequently on the angle of the hip joint that may
359 directly impact the pedalling technique [26]. Furthermore,
360 we restricted the position of the hands on the top of the
361 handlebars, but gripping the lower part of the curved han-
362 dlebars on road bicycles can further reinforce the influence
363 of an inclined torso, creating a more aerodynamic position,
364 yet modifying pedalling characteristics [26].

365 Surprisingly, despite the difference in the position of the
upper body between the frames as well as the influence

366 mentioned in literature of bike-setup and bike features (i.e.,
367 wheel size) on pedalling technique and forces exerted on
368 the pedals [6,7,27,28,35,36], the application templates for
369 forces exerted at crank level were identical when changing
370 bike frame. Contrary to our initial hypothesis, the ath-
371 letes have a different posture but a same force application
372 template which implies an amount of internal reorganisation
373 in order to maintain an identical mechanical output at the
374 crank level. A parallel can be drawn with current research in
375 the field of running which has shown that the use of different
376 running shoes does not necessarily affect an athlete's run-
377 ning pattern [37]. These authors posit the concept of a new
378 paradigm called preferred movement path (PMP), a pattern
379 established through practice and which tends to be naturally
380 retained, regardless of equipment used. Our results support
381 this notion in extending it to the field of cycling.

382 Our research focused on the link between the bike frame
383 used and the force production pattern that constitutes the
384 mechanical expression of pedalling. Although the pedalling
385 efficiency is a (gold) standard variable describing the qual-
386 ity of the pedalling pattern, it is not sufficient to describe
387 the complete pedalling technique [18]. Movement kinemat-
388 ics and muscle activation strategies are other descriptors of
389 the pedalling technique that would be interesting to explore
390 in order to further assess the location of the reorganisation,
391 the comfort or the injury risks, but these points are beyond
392 the scope of this study.

393 5. Conclusion

394 The present study focused on the mechanical characteristics
395 of XCO athletes' pedalling technique. The biomechanical
396 characteristics of pedalling are affected by the required out-
397 put power but are comparable between the frames tested
398 (XCO or Road). Despite a known influence of the equipment
399 on performance and the difference in bike-setup and bike
400 geometries reported between the participants' mountain
401 bike and road frames, the use of one or the other did not
402 lead to a change in the template of the forces exerted on
403 the crank. The athletes seem to retain the same pedalling
404 technique when using equipment that is not specific to their
405 discipline. With young riders or people undergoing recovery
406 treatment, the internal variability provided by an alterna-
407 tion of frame types could be beneficial. For athletes close to
408 the competition, such change in the bike frame could prove
409 detrimental to the performance.

410 Disclosure of interest

411 The authors declare that they have no competing interest.

412 Acknowledgements

413 The authors would like to acknowledge the partici-
414 pants, members of the MTB team Marseille Technoteam13,
415 Aix-Marseille University. The authors received no finan-
416 cial support for the preparation and completion of this
417 manuscript and declare that they have no conflict of
interest.

Please cite this article in press as: Devys S, et al. Does changing the bike frame influence pedal force pattern in mountain bike cyclists? Sci sports (2019), <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2018.12.006>

References

- 418
419
420
421 Q8
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476 Q9
477
478
479
480
481
482
483
- [1] Hays A, Devys S, Bertin D, Marquet L, Brisswalter J. Understanding the physiological requirements of the mountain bike cross-country olympic race format. *Front Physiol* 2018;9, <http://dx.doi.org/10.3389/fphys.2018.01062>.
- [2] Sanderson DJ. The influence of cadence and power output on the biomechanics of force application during steady-rate cycling in competitive and recreational cyclists. *J Sport Sci* 1991;9:191–203.
- [3] Stapelfeldt B, Schwirtz A, Schumacher YO, Hillebrecht M. Workload demands in mountain bike racing. *Int J Sports Med* 2004;25:294–300, <http://dx.doi.org/10.1055/s-2004-819937>.
- [4] Carpes F, Dagnese F, Bini R, Diefenthaler F, Rossato M, Mota CB, et al. Características cinemáticas da pedalada em ciclistas competitivos de diferentes modalidades. Pedaling kinematics characteristics of competitive cyclists of different disciplines; 2006.
- [5] Macdermid PW, Stannard S. Mechanical work and physiological responses to simulated cross country mountain bike racing. *J Sports Sci* 2012;30:1491–501, <http://dx.doi.org/10.1080/02640414.2012.711487>.
- [6] Bini RR, Hume PA, Lanferdini FJ, Vaz MA. Effects of body positions on the saddle on pedalling technique for cyclists and triathletes. *Eur J Sport Sci* 2014;14(1):S413–20, <http://dx.doi.org/10.1080/17461391.2012.708792>.
- [7] Verma R, Hansen EA, de Zee M, Madeleine P. Effect of seat positions on discomfort, muscle activation, pressure distribution and pedal force during cycling. *J Electromyogr Kinesiol* 2016;27:78–86, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jelekin.2016.02.003>.
- [8] Hurst HT, Swarén M, Hébert-Losier K, Ericsson F, Sinclair J, Atkins S, et al. Influence of course type on upper body muscle activity in elite cross-country and downhill mountain bikers during off road downhill cycling. *J Sci Cycl* 2012;1:2.
- [9] Novak AR, Dascombe BJ. Physiological and performance characteristics of road, mountain bike and BMX cyclists. *J Sci Cycl* 2014;3:9–16, <http://dx.doi.org/10.28985/jsc.v3i3.104>.
- [10] Muyor JM, Zabala M. Road cycling and mountain biking produces adaptations on the spine and hamstrings extensibility. *Int J Sports Med* 2016;37:43–9, <http://dx.doi.org/10.1055/s-0035-1555861>.
- [11] Jeannot J, Bertucci W. Evolution of pedalling biomechanics during a Wingate test for different cyclist types: a preliminary study. *Comput Methods Biomech Biomed Engin* 2012;15:215–7, <http://dx.doi.org/10.1080/10255842.2012.713613>.
- [12] Bini RR, Diefenthaler F. Kinetics and kinematics analysis of incremental cycling to exhaustion. *Sports Biomech* 2010;9:223–35, <http://dx.doi.org/10.1080/14763141.2010.540672>.
- [13] Padulo J, Powell DW, Ardigo LP, Viggiano D. Modifications in activation of lower limb muscles as a function of initial foot position in cycling. *J Electromyogr Kinesiol* 2015;25:648–52, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jelekin.2015.03.005>.
- [14] Dorel S, Drouet J-M, Couturier A, Champoux Y, Hug F. Changes of pedaling technique and muscle coordination during an exhaustive exercise. *Med Sci Sports Exerc* 2009;41:1277–86, <http://dx.doi.org/10.1249/MSS.0b013e31819825f8>.
- [15] Lafortune MA, Cavanagh PR. Effectiveness and efficiency during bicycle riding. *Int Ser Biomech* 1983.
- [16] Coyle EF, Feltner ME, Kautz SA, Hamilton MT, Montain SJ, Baylor AM, et al. Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 1991;23:93–107.
- [17] Zameziati K, Mornieux G, Rouffet D, Belli A. Relationship between the increase of effectiveness indexes and the increase of muscular efficiency with cycling power. *Eur J Appl Physiol* 2006;96:274–81, <http://dx.doi.org/10.1007/s00421-005-0077-5>.
- [18] Bini RR, Hume P, Croft JL, Kilding A. Pedal force effectiveness in cycling: a review of constraints and training effects. *J Sci Cycl* 2013;2:11–24.
- [19] Ericson MO, Nisell R. Efficiency of pedal forces during ergometer cycling. *Int J Sports Med* 1988;9:118–22.
- [20] Kautz SA, Feltner ME, Coyle EF, Baylor AM. The pedaling technique of elite endurance cyclists changes with increasing workload at constant cadence. *Int J Sport Biomech* 1991;7:29–53.
- [21] Rossato M, Bini RR, Carpes FP, Diefenthaler F, Moro ARP. Cadence and workload effects on pedaling technique of well-trained cyclists. *Int J Sports Med* 2008;29:746–52, <http://dx.doi.org/10.1055/s-2008-1038375>.
- [22] Patterson RP, Moreno MI. Bicycle pedaling forces as a function of pedaling rate and power output. *Med Sci Sports Exerc* 1990;22:512–6.
- [23] Candotti CT, Ribeiro J, Soares DP, De Oliveira AR, Loss JF, Guimaraes ACS. Effective force and economy of triathletes and cyclists. *Sports Biomech* 2007;6:31–43, <http://dx.doi.org/10.1080/14763140601058490>.
- [24] Padulo J, Laffaye G, Bertucci W, Chauouchi A, Viggiano D. Optimisation of starting conditions in track cycling. *Sport Sci Health* 2014;10:189–98, <http://dx.doi.org/10.1007/s11332-014-0192-y>.
- [25] Bini RR, Hume PA, Crofta JL. Effects of saddle height on pedal force effectiveness. *Procedia Eng* 2011;13:51–5, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.05.050>.
- [26] Dorel, Couturier A, Hug F. Influence of different racing positions on mechanical and electromyographic patterns during pedalling. *Scand J Med Sci Sports* 2009;19:44–54, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0838.2007.00765.x>.
- [27] Steiner T, Müller B, Maier T, Wehrli JP. Performance differences when using 26- and 29-inch-wheel bikes in Swiss National Team cross-country mountain bikers. *J Sports Sci* 2016;34:1438–44, <http://dx.doi.org/10.1080/02640414.2015.1119294>.
- [28] Diefenthaler F, Bini RR, Laitani OL, Guimaraes ACS, Nabinger E, Carpes FP, et al. Assessment of the effects of saddle position on cyclists pedaling technique. *Med Sci Sports Exerc* 2006;38:77, <http://dx.doi.org/10.1249/00005768-200605001-00821>.
- [29] Padulo J, Di Capua R, Viggiano D. Pedaling time variability is increased in dropped riding position. *Eur J Appl Physiol* 2012;112:3161–5, <http://dx.doi.org/10.1007/s00421-011-2282-8>.
- [30] Nicolò A, Bazzucchi I, Haxhi J, Felici F, Sacchetti M. Comparing continuous intermittent exercise: an “Isoeffort” and “Isotime” approach. *PLoS ONE* 2014;9, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0094990>.
- [31] Washburn RA, Seals DR. Comparison of continuous and discontinuous protocols for the determination of peak oxygen uptake in arm cranking. *Eur J Appl Physiol* 1983;3–6. Q10
- [32] Reiser M, Meyer T, Kindermann W, Daugs R. Transferability of workload measurements between three different types of ergometer. *Eur J Appl Physiol* 2000;82:245–9, <http://dx.doi.org/10.1007/s004210050678>.
- [33] Impellizzeri F, Sassi A, Rodriguez-Alonso M, Mognoni P, Marcora S. Exercise intensity during off-road cycling competitions. *Med Sci Sports Exerc* 2002;34:1808–13, <http://dx.doi.org/10.1249/01.MSS.0000036690.39627.F7>.
- [34] Pataky T, Vanrenterghem J, Robinson M. Zero- vs. one-dimensional, parametric vs. non-parametric, and confidence interval vs. hypothesis testing procedures in one-dimensional biomechanical trajectory analysis. *J Biomech* 2015;48, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiomech.2015.02.051>.
- 537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550

Please cite this article in press as: Devys S, et al. Does changing the bike frame influence pedal force pattern in mountain bike cyclists? *Sci sports* (2019), <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2018.12.006>

- 551 [35] Schultz SJ, Gordon SJ. Riding position and lumbar spine angle in recreational cyclists: a pilot study. *Int J Exerc Sci* 2010;3:174–81. 557
- 552 558
- 553 559
- 554 [36] Menard M, Domalain M, Decatoire A, Lacouture P. Influence of saddle setback on pedalling technique effectiveness in cycling. *Sports Biomech* 2016;15:462–72, <http://dx.doi.org/10.1080/14763141.2016.1176244>. 560
- 555 561
- 556 [37] Nigg B, Baltich J, Hoerzer S, Enders H. Running shoes and running injuries: mythbusting and a proposal for two new paradigms: "preferred movement path" and "comfort filter". *Br J Sports Med* 2015;49:1290–4, <http://dx.doi.org/10.1136/bjsports-2015-095054>.

UNCORRECTED PROOF

Please cite this article in press as: Devys S, et al. Does changing the bike frame influence pedal force pattern in mountain bike cyclists? *Sci sports* (2019), <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2018.12.006>

4.3.Synthèse

L'étude de l'influence du type de cadre sur le pédalage des athlètes de XCO nous a permis de conforter les informations de la littérature et de mettre en lumière de nouveaux éléments. Notre hypothèse de départ était que la technique de pédalage diffère entre un cadre de vélo de route et un cadre de VTT, et donc que la nature du cadre influe sur la manière de pédaler. Dans un premier temps, nous avons pu vérifier que les effets déjà connus de l'évolution de la puissance s'appliquaient également à des intensités plus élevées. En effet, les recherches existantes (Patterson & Moreno, 1990; Sanderson, 1991; Zameziati et al., 2006) avaient été effectuées plutôt à faibles et moyennes puissances (de 100 à 300 W environ). Les caractéristiques biomécaniques du pédalage évoluent bien avec le niveau de puissance demandé vers une plus grande efficacité et un pic de force plus élevé mais sans qu'il y ait de changement de l'angle de poussée maximal. Grâce à l'analyse des dimensions des cadres, nous avons également mis en évidence que les athlètes réglaient leurs machines de façon à retrouver une position identique des membres inférieurs sur leurs deux cadres, mais que l'inclinaison de leur buste devait être différente. Cependant, malgré l'effet prouvé de cette différence de position sur le pédalage, l'utilisation d'un cadre ou de l'autre n'entraîne pas de changements dans le patron d'application des forces. Malgré une posture modifiée, la sortie motrice est identique, ce qui semble en contradiction avec les travaux de Dorel et al (2009).

Notre hypothèse est donc invalidée : les athlètes semblent conserver la même technique de pédalage lors de l'utilisation de matériel non-spécifique à leur discipline. Mais la différence de posture observée incite à penser qu'une réorganisation interne (cinématique de pédalage, activations musculaires) a lieu pour permettre cette continuité. Il serait intéressant pour le futur de poursuivre les recherches en élargissant le domaine d'analyse. L'exploration des paramètres cinématiques et électromyographiques nous semblent particulièrement pertinents dans la démarche d'identification des mécanismes d'adaptation de la technique de pédalage suggérés par les résultats de notre étude.

Les conclusions de nos recherches peuvent être également un apport important pour l'entraînement. Nous pensons que l'utilisation de cadre de vélo de route peut être conseillée à certains athlètes mais que cela va dépendre du type et du niveau de pratique. Par exemple, pour les vététistes cherchant à atteindre un haut niveau d'expertise et de performance il semble que l'utilisation de cadre de vélo de route pourrait être néfaste dans leur démarche de spécialisation. En revanche, le développement de la redondance et la variabilité apportée par une alternance des types de cadre semblerait bénéfique et adéquat pour des coureurs jeunes ou des personnes en phase de réhabilitation. Cependant une meilleure compréhension des mécanismes d'adaptation sous-jacents sera nécessaire avant de pouvoir définitivement se prononcer sur le sujet.

5. Discussion générale

Lorsque l'on s'engage dans une démarche de performance sportive, il est nécessaire de bien connaître les multiples aspects de son sport pour atteindre le succès. La plupart du temps, les athlètes, les entraîneurs et les chercheurs se sont posé la question suivante : « Comment atteindre la meilleure performance ? ». De manière générale, ils se sont concentrés sur les facteurs humains ou matériels, et ils ont organisé leur réflexion autour des sportifs, de leurs capacités et de leurs outils. Nous avons souhaité nous démarquer de cette approche en proposant un paradigme de recherche différent, centré sur la pratique sportive, dans le but de déterminer certains paramètres de la performance. De ce fait, nous avons cherché à répondre à la problématique suivante : « Quelles sont les caractéristiques actuelles de la discipline du VTT XCO moderne ? ». L'emploi du terme *moderne* est ici très important compte tenu de l'évolution qu'a subi la discipline ces dernières années. Une remise en question des déterminants de la performance nous a semblé obligatoire au vu des changements constatés dans la nature de l'activité.

Les apports de notre travail

Nous avons ainsi montré que les athlètes ne pédalent pas pendant près d'un quart du temps total de course, mais que ce n'était pas pour autant des phases de repos complet. Cela nous a aussi permis d'observer que la discipline était constituée de nombreuses phases de haute intensité. Nous avons mis en évidence que le VTT XCO, dans son format actuel, était une discipline à la fois intermittente et acyclique. Cela signifie que le type d'effort se rapprocherait plus de certains sports collectifs que des disciplines cyclistes. Il a aussi été montré que l'utilisation de la mesure de la VO₂ était la seule variable valable pour avoir un retour immédiat et correct sur l'effort, la puissance et le rythme cardiaque présentant respectivement des problèmes de continuité et de latence. Du fait de cette dynamique atypique dans les sports cyclistes, il devient évident que la majorité des tests effectués en laboratoire et conçus pour la pratique sur route sont inadaptés aux athlètes de VTT XCO.

Notre recherche nous a également mené à comparer la technique de pédalage selon le type de cadre utilisé. Il en résulte que les athlètes de XCO conservent le même pattern d'application des forces avec un matériel qui pourtant les place partiellement dans une posture différente, censée influencer sur leur technique. L'explication qui s'impose alors est qu'une adaptation cinématique et/ou musculaire, permise grâce à la redondance musculo-articulaire, a lieu et permet de conserver la sortie motrice identique.

Nous avons ainsi effectué une recherche qui a couvert différents domaines de recherche, mais ce travail pluridisciplinaire est aussi et avant tout un mélange de plusieurs types d'approches expérimentales. Nous avons ainsi alterné entre des phases d'observations de la pratique en extérieur sur circuit de compétition et des sessions de pédalage en environnement contrôlé et instrumenté. Chacune de ces approches présente des avantages et des inconvénients bien particuliers, et l'intérêt de les combiner n'a jamais été aussi grand, comme nous allons être amené à le montrer.

L'expertise de la performance venant du terrain

Nous avons souhaité commencer notre travail en allant sur le terrain, au contact du plus haut niveau de performance de l'activité afin de constater l'état actuel de la discipline. Cette démarche d'approche par l'observation de terrain a l'avantage de proposer des situations expérimentales perturbant au minimum les athlètes dans leur pratique. On trouve même certaines recherches qui montrent que les expérimentations de terrain comme étant plus efficaces et précises que celle effectuées en laboratoire (pour le BMX) (Rylands et al., 2015). Nous avons choisi les deux grandes orientations de nos travaux afin de cerner deux des enjeux majeurs de la pratique que sont la physiologie des efforts demandés par les compétitions actuelles et l'efficacité de la relation homme-matériel formée par le coureur et son vélo. La littérature nous a apporté un certain nombre d'informations au sujet de la dynamique des efforts en VTT XCO.

Concernant ce rythme de course, les recherches d'Abbiss et al. (2013) ont permis de constater que les meilleurs athlètes sont ceux qui adoptent un rythme plus régulier et surtout qui perdent moins de temps dans les sections de montées dites « techniques ». Cela a pu se

vérifier dans d'autres disciplines comme le contre-la-montre, où il a été montré qu'une vitesse réduite au départ d'une course de 20km suivi d'un rythme régulier permettait d'améliorer la performance (Mattern et al.,2001). Le format des courses de XCO inclut un départ en grille qui va imposer une dynamique initiale relativement explosive et entraîner un regroupement lors des premiers obstacles, changement de direction ou rétrécissement de la piste, ce qui va provoquer un ralentissement important pour les athlètes n'ayant pas réussi à se positionner aux avant-postes. Toutefois, ceci est à nuancer selon les catégories de pratique, car au plus haut-niveau, les athlètes sont peu nombreux sur la ligne de départ (une trentaine). Le rythme initial élevé que nous avons observé n'est alors pas réalisé pour éviter un engorgement mais plutôt pour se mettre en position de pouvoir imposer le rythme de course.

Ceci trouve un écho particulier avec nos deux premières études, grâce auxquelles nous nous attendions à valider qu'en XCO moderne, il y a des différences de comportement entre les tours et qu'il est nécessaire d'être endurant à la répétition des efforts. Nous avons en effet établi que la nature de l'activité a changé avec les modifications du cadre réglementaire et les évolutions technologiques pour devenir acyclique et intermittente. Elle demande de savoir répéter des efforts de hautes intensités, notamment dès le début de la course. Ces conclusions ont été confirmées par plusieurs recherches menées parallèlement à la nôtre (Granier et al., 2018; Viana et al., 2018), qui évoquent un gros départ très sollicitant suivi par un tempo plus régulier mais de plus hautes intensités qu'auparavant.

La spécificité de ce contexte de « *mass-start* » constitue une des principales limites des études de terrains que nous avons menées. En effet, il était bien trop complexe de recréer une situation identique à la compétition pour réaliser des expérimentations. Ce faisant, nous avons en partie mis de côté la dimension concurrentielle et stratégique de la course. Nous avons toutefois tenté de simuler au mieux le sentiment d'adversité chez nos sujets en proposant un départ simultané des coureurs par binômes de niveau d'expertise proche. La réalité du terrain nous impose donc un cadre relativement contraint si l'on souhaite observer la pratique sans la dénaturer et le cadre des compétitions restreint d'autant plus les possibilités de mesures qui pourraient perturber les athlètes (poids, gêne, concentration, ...).

L'approche de terrain permet cependant de mettre en lumière la spécificité de la discipline dans d'autres situations complexes à étudier comme les portions de descente techniques. Des chercheurs (Miller et al. 2014) ont par exemple pu montrer qu'il était recommandé aux vététistes de se concentrer sur leur aptitude à conserver de la vitesse en descente plutôt qu'essayer de pédaler. Cela, ajouté au fait qu'un quart du temps total de course soit passé sans pédaler, fait qu'il semble particulièrement intéressant de travailler ce type de phases à l'entraînement.

Au cours de nos expérimentations nous avons mis en évidence des mécanismes de gestion de l'effort différents selon les athlètes, que ce soit en terme de consommation énergétique ou de posture de pilotage. Certains athlètes sont très constants dans leur effort et semblent gérer leur effort à long terme, quand d'autres sont beaucoup plus variables et semble avoir besoin d'ajuster de manière plus dynamique leur dépense d'énergie et/ou leur assise. La performance, bien que contrainte par plusieurs aspects, peut être atteinte de différentes manières et l'identification de ces profils nous rappelle l'importance de l'aspect individuel de la réflexion qui doit être menée dans la démarche de l'analyse de la pratique. Bien qu'il y ait des facteurs favorisant la performance et des caractéristiques spécifiques à travailler, tous les champions ne sont pas identiques. Le nombre relativement restreint de coureurs qui ont pris part à nos expérimentations, du fait de nos critères de sélection stricts, n'a pas permis la validation statistique de ces profils. Cependant, compte tenu des différences constatées, et cela dans plusieurs domaines, nous sommes convaincus qu'il serait intéressant de développer ce type d'analyses.



Figure 58. Photographie de coureurs lors de la coupe du monde de VTT cross-country UCI 2018 à Albstadt (Allemagne) (@BartekWolinski)

Les tests de terrain sont également importants pour les athlètes et les entraîneurs car ils apportent des informations précieuses sur la performance en évitant le temps et le coût lié à l'étude en laboratoire, comme le précisent Miller et al. (2014). Leur étude a d'ailleurs mis en évidence qu'avec un test de terrain basé sur l'évaluation de la puissance développée de manière intermittente pouvait renseigner sur les capacités et le niveau de préparation des athlètes. Le lien entre les recherches de terrain et celles en laboratoire reste au cœur de nombreux travaux, comme ceux de Prins et al (2006), qui ont observé la correspondance entre la performance mesurée en course avec des valeurs physiologiques déterminées lors d'expériences préalables sur ergocycles. Ils ont notamment observé une corrélation entre les temps de course en compétition et la PMA relative au poids de corps, ce qui renvoie une fois de plus au besoin de normaliser et personnaliser les analyses. Ils indiquent toutefois que des recherches supplémentaires sont nécessaires pour créer un test spécifique à la pratique qui déterminerait une partie inexpliquée (30%) de la variance dans la performance.

Les atouts des laboratoires

La typologie des efforts en VTT n'a pas été seulement observée et étudiée sur le terrain. Une étude générale de la physiologie des cyclistes réalisée dès 1997 (Wilber) a mis en évidence que de manière générale les vététistes et les routiers possédaient un profil similaire. Toutefois, l'évolution de la discipline du XCO a fait apparaître beaucoup plus de variation du rythme au cours des années et, comme nous avons pu le voir précédemment, les zones de travail spécifiques comme sections de montée et de descente techniques semblent déterminantes dans la performance. La forte demande en efforts courts et intenses associés à ces portions se traduit par des capacités anaérobiques significatives mesurables en laboratoire. Cela a été confirmé pour le format moderne de la discipline par les recherches de Fornasiero et al (2017) qui a mis en évidence que la capacité de répéter de hauts pics de puissance anaérobie est essentiel pour performer. Une étude très récente de Bejder et al (2018) a d'ailleurs mis en évidence que les paramètres issus d'une session de sprints répétés (4x30 sec), correspondant tout à fait à ce type d'efforts, pouvaient expliquer 88% de la variance dans la performance en VTT XCO. Mieux encore, en combinant la VO₂max relative au poids de corps, l'indice de fatigue d'un sprint de 30 secondes ($FI = P_{min}/P_{max}$) et le couple maximal du quadriceps femoris, cela pouvait aller jusqu'à 98% de la variance.

Mais la dynamique de course n'est pas le seul domaine de recherche permettant de caractériser la discipline moderne du XCO. Notre travail s'est donc par la suite orienté vers l'étude d'une influence du matériel sur l'efficacité du pédalage. Cela s'est fait en laboratoire afin de pouvoir contrôler un maximum de paramètres expérimentaux mais également car les outils permettant une grande précision dans la mesure n'étaient pas transportables dans notre cas de figure. En effet, ce type de travail permet d'avoir le contrôle sur l'environnement, le matériel et même sur une partie des contraintes. Cela permet d'isoler le plus précisément possible les variables que l'on souhaite étudier, malgré la potentielle dénaturation de l'activité.

Les études existantes concernant le matériel et la technique de pédalage sont d'ailleurs majoritairement réalisées en intérieur. Ce travail de laboratoire, le plus souvent sur ergocycle, a permis de montrer qu'il y a des répercussions de la posture de pilotage sur la manière de pédaler. Il a été par exemple prouvé qu'une modification de la position de la selle par rapport à un réglage habituel pouvaient modifier les forces appliquées à la pédale (Diefenthaler et al., 2006, Bini et al. 2011). Ce pattern d'application des forces est d'ailleurs bien différent entre la position assise et la position en danseuse (Poirier 2009). Plus récemment, cette même comparaison a mis en évidence que l'économie métabolique était moindre en étant debout et que cela était lié à une augmentation de l'activité des muscles extenseurs du genou (Arkesteijn 2016). Lorsque l'on pense aux différences de temps passé selon la posture mis en évidence dans notre seconde étude, cela nous encourage encore plus à approfondir l'étude des comportements individuels des athlètes. En effet, il serait intéressant de voir si les profils déterminés sont toujours aussi marqués une fois les biais induits par la variabilité des conditions de terrain retiré grâce au travail en laboratoire et aux possibilités de contrôles permettant de gommer une partie de cette variabilité.

L'étude de la posture de pilotage en laboratoire ne s'est pas limitée au réglage de la selle mais également à la position du haut du corps. Dorel et al (2009) ont montré qu'en restant assis mais en changeant la prise du guidon, l'efficacité du pédalage évoluait. Les effets de la position des mains sur le cintre, ou ceux des réglages de la selle que nous avons pu décrire plus tôt, constituent une modification de la position générale du coureur, car le cintre et les pédales sont des points d'ancrages fixes (si l'on met de côté la longueur des manivelles et certaines

potences ajustables). Au final, c'est surtout l'angle du tronc qui est affecté, et il a été montré que celui-ci est en lien avec la puissance moyenne et maximale développée (Too, 1994).

C'est avec l'ensemble de ces éléments en tête que notre étude s'est construite dans le but de déterminer la spécificité du pédalage des athlètes de VTT XCO. En étudiant la discipline et ses différentes facettes (préparation, entraînements, compétitions), nous avons remarqué que les cyclistes tout-terrains utilisaient également du matériel de cyclisme de route dans le cadre de leur entraînement. Ce matériel est spécifique à chaque discipline, et il semble très différent de l'une à l'autre. Nous nous sommes donc interrogés sur la pertinence de l'utilisation de matériel non-spécifique pour des vététistes, et notamment sur les effets que pourraient avoir une telle utilisation sur le pédalage.

En se basant sur la littérature, nous nous attendions logiquement à une spécificité de la technique de pédalage liée au matériel de la discipline. Toutefois, nous avons observé que l'efficacité du pédalage d'un vététiste est comparable sur des cadres partiellement différents. L'influence du matériel sur la performance a pourtant déjà été constaté. Par exemple en triathlon, une modification de l'angle de selle du cadre de vélo de 73° à 81° a permis d'améliorer à la fois la performance d'une course de 10km et celle de l'épreuve combinée (Garside & Doran, 2000). Mais cela est à nuancer car il a été aussi montré qu'un changement de la technique de pédalage n'a pas systématiquement d'effet sur l'efficacité (Korff et al., 2007). Durant notre étude nous avons pu constater que l'angulation de la tige de selle était relativement comparable entre les cadres de VTT et de vélo de route des athlètes (respectivement 73° et 74°) et peu variable d'un modèle à un autre. Bien que de nombreuses autres dimensions varient, cette stabilité d'angle permet aux athlètes de transposer une partie de leurs réglages d'un engin à l'autre, un accord de mesure favorisé par le secteur commercial. Il reste toutefois étonnant d'observer une sortie motrice identique alors même que les paramètres de la position de pédalage sont différents, notamment au niveau du haut du corps. Cela met en lumière l'adaptabilité de l'humain et sa capacité à faire face de multiples manières aux contraintes. Des données biomécaniques supplémentaires et une analyse plus poussée, comme de la modélisation numérique, pourrait permettre de comprendre ce surprenant résultat. Une étude complémentaire de terrain serait également très intéressante pour vérifier la correspondance ou non des postures de pédalage.

Notre expérimentation présente toutefois la limite majeure de la plupart des recherches de laboratoire : une certaine dénaturation de la pratique liée au contexte et aux modalités de mesure. En effet, l'acquisition de données de force de cette précision requiert du matériel difficilement transportable et impossible à utiliser en condition réelle sans gêne pour l'athlète. Cependant, nous gagnons en précision ce que nous perdons en authenticité et les durées courtes d'acquisition limitent cette influence.

6. Valorisation et recommandations

Un travail au service de la performance

Comme annoncé en introduction à cette thèse, l'ensemble de notre travail a pour but de répondre à une problématique venant du terrain : quelles sont les caractéristiques de la discipline du VTT XCO à l'heure actuelle, à la suite des évolutions importantes de la dernière décennie ? C'est une réflexion qui a commencé à l'origine en collaboration avec les athlètes, entraîneurs et techniciens, et dont l'issue a aussi pour objectif de rassembler l'ensemble des données, informations et savoirs acquis au cours de ce travail afin de proposer des recommandations concrètes. Ce chemin nous a mené à établir un protocole spécifique permettant de diagnostiquer les capacités des athlètes permettant d'adapter la préparation des coureurs.

Un test d'analyse de la performance spécifique au VTT XCO

Derrière la démarche de création d'un protocole dédié au XCO, il existe une double volonté de caractérisation de la discipline et de compréhension de certains mécanismes sous-jacents. D'un côté il y a un aspect de la recherche plutôt fondamental, où il s'agirait d'aller plus loin dans l'étude multi-dimensionnelle du pédalage. Comme nous avons pu le décrire précédemment cela passera par des mesures et estimations de la contribution relative des muscles du pédalage et des efforts associés qui seront utilisés au sein d'une analyse de dynamique inverse. D'un autre côté, la volonté de créer un test dédié à la discipline du VTT XCO n'est pas nouvelle. Dès 2007, l'expression du besoin de plus de tests spécifiques s'est fait entendre, car les diagnostics physiologiques des cyclistes classiques (routiers) étaient inadaptés aux vététistes (Prins et al., 2007). Nous souhaitons donc, en nous basant sur l'ensemble des connaissances acquises au cours de nos travaux, proposer un protocole de test permettant de mesurer des paramètres pertinents de la performance dans le contexte de la pratique moderne du XCO.

A l'heure actuelle, le plus gros déficit des tests proposés classiquement aux vététistes vient de l'utilisation de tests standards en laboratoire pour tous les cyclistes sans forcément de distinction de discipline, et donc de l'absence de prise en compte de la nature réelle des efforts sur le terrain selon la pratique. En ayant conscience de ces éléments et après avoir composé avec les deux approches lors de ce travail de thèse, nous pensons qu'il serait intéressant de modifier la manière dont le diagnostic de performance des athlètes de VTT XCO est actuellement réalisé en combinant ces techniques.

En effet, l'étude de terrain, et à plus forte raison la compétition, est la seule situation où il est possible d'observer la pratique dans des conditions écologiques, sans dénaturation et avec la possibilité d'avoir une certaine dynamique, des obstacles, des adversaires et la motivation associée. La contrepartie est que cela limite les capacités de mesures car tous les dispositifs ne peuvent pas être embarqués, et qu'il est difficile de contrôler la variabilité des conditions de pratique. A l'inverse, la mise en place d'analyses en laboratoire permet de maîtriser ces conditions et d'utiliser des outils plus précis mais plus encombrants.

Terrain	Laboratoire
✓ Réalité des efforts / Dynamique	✗ Pratique dénaturée
✓ Concurrence / Motivation	✗ Isolement
✗ Evènements imprévus	✓ Maîtrise de la variabilité
✗ Possibilités de mesure restreintes	✓ Choix et précision de la mesure

Tableau 6. Avantages et inconvénients du type d'approche utilisé

Premièrement, nous pensons qu'il faut privilégier l'acquisition de données de manière non-invasive et non perturbante pour les athlètes lors des compétitions. Il s'agit là d'obtenir un aperçu direct des capacités de performance du coureur. Il pourrait s'agir des données GPS, du rythme cardiaque ou de la puissance développée recueillie grâce à un pédalier instrumenté. L'intérêt résidant également dans le fait que ce type d'observations peut aussi mener à l'identification de profils comportementaux. Nous avons pu voir que la puissance n'était pas

forcément l'indicateur reflétant le plus directement la performance, cependant il permettrait de nous éclairer sur la manière dont l'athlète gère ses efforts et l'utilisation de pédalier instrumenté est aujourd'hui fortement démocratisée et non perturbant pour les coureurs. Il s'agirait donc de monitorer l'évolution des capacités de l'athlète au fur et à mesure des courses et des compétitions pour pouvoir l'aider avec la distribution de son temps passé selon les différentes zones d'intensité.

Au niveau de l'analyse, une attention toute particulière serait portée sur les durées des phases au-dessus de PMA et leur nombre. Cela pourrait indiquer le type de travail à privilégier pour améliorer les capacités des athlètes et leur permettre d'être plus en phase avec la nature des efforts. La répartition du temps passé selon les différentes portions du parcours et leur nature (topographie, surface, largeur), permettrait d'identifier potentiellement des phases de courses particulières posant problème et nécessitant plus d'attention à l'entraînement. Et bien évidemment toutes ces analyses se faisant en gardant à l'esprit que l'attitude et les capacités des athlètes évoluent selon les tours.

Ensuite, au sein du laboratoire, nous pensons que le plus intéressant serait de diagnostiquer la capacité de l'athlète à répéter les efforts courts et intenses. Pour cela, nous lui demanderions de réaliser une répétition de sprints afin d'obtenir une certaine mesure des capacités anaérobiques des coureurs. La durée de ces accélérations devrait être en accord avec la durée maximale typique des épisodes au-dessus de PMA déterminée lors de notre expérimentation, à savoir une dizaine de secondes. Dans le but de correspondre à la réalité des phases intenses de course, l'intervalle entre chaque sprint pourrait alors être limité (par exemple 30 secondes). Pendant cette période, l'intensité ne devrait pas retomber à zéro mais plutôt rester à un niveau élevé comme en compétition. Le nombre de sprints devrait permettre d'atteindre une durée totale d'effort continu semblable à ce que les athlètes pourraient réellement rencontrer, c'est-à-dire inférieure à 5 minutes. Partant de ce principe, nous pourrions demander d'enchaîner 5 sprints. Cela donnerait donc un test complet de 3 minutes et 20 secondes.

En ce qui concerne l'intensité, il faut nécessairement que celle-ci soit identique pour chacun, ce qui implique de normaliser la charge de travail en fonction d'une valeur de référence. L'utilisation d'un ergocycle avec frein pilotable serait nécessaire afin d'imposer une intensité

relative en fonction du poids de corps. Comme il s'agit d'un protocole qui aurait lieu en laboratoire, nous pensons qu'il pourrait aussi être associé au test classique le plus courant chez les cyclistes : le test de détermination de la PMA par protocole incrémental. Cela permettrait de normaliser l'intensité de l'exercice par rapport aux capacités maximales des individus. La détermination des seuils physiologiques lors de ce test par une analyse des échanges gazeux pourrait également apporter des renseignements supplémentaires permettant de fixer l'intensité de récupération au niveau du SV2 de chaque athlète, ce qui correspondrait au type d'effort rencontré en cours de pratique.

Au niveau de l'analyse, une attention toute particulière serait portée sur la perte de puissance au cours de chaque sprint, mais surtout entre le premier et le dernier sprint. D'après ce que nous avons mis en évidence, les athlètes ayant les meilleures qualités pour performer en VTT XCO devraient être ceux qui montrent la meilleure capacité à enchaîner les efforts intenses, donc ceux qui ont le moins de perte de puissance moyenne entre la première et la dernière accélération.

Protocole

Objectif : Obtenir un aperçu des capacités de performance en VTT XCO d'un athlète

Méthode : Mesure des paramètres liés à la performance dans la pratique moderne du XCO

Etape 1 : Laboratoire

Descriptif : Détermination de la PMA et de PSV_2 .

Outils : Ergocycle instrumenté programmable, analyseur de gaz.

Mesures : Test incrémental discontinu

Echauffement de 5 minutes à 100 Watts

Augmentation progressive de l'intensité de 30 Watts par palier de 2 minutes

Période de récupération de 30 secondes à 100 Watts après chaque palier

Répétition jusqu'à épuisement.

Analyses :

PMA = Puissance maintenue plus d'une minute lors du dernier palier atteint

PSV_2 = Niveau de puissance estimé lors de l'atteinte du second seuil (SV_2)

Etape 2 : Laboratoire

Descriptif : Evaluation des qualités de répétition d'efforts

Outils : Ergocycle instrumenté programmable

Mesures : Enchaînement de sprints courts et intenses

Echauffement de 6 minutes à $30\%_{PMA}$

3x Echauffement de 30 secondes à $100\%_{PMA}$ plus 1 minute de récupération à $30\%_{PMA}$

Récupération de 5 minutes

5x Sprints de 10 secondes avec résistance normalisée selon le poids de corps (Wingate)

suiivi de 30 secondes de récupération à PSV_2 .

Analyses :

PPM = Perte de Puissance Moyenne (entre le premier et le dernier sprint)

PRC = Puissance Relative Cumulée (sur toute la durée du test)

Etape 3 : Terrain

Descriptif : Recueil de données en situation de compétition

Outils : Pédalier instrumenté, GPS

Mesures : Situation de course classique

Evolution de la Position en 3 dimensions et chronométrage

Suivi de la puissance durant la course

Analyses :

Segmentation du tracé et calcul du temps passé dans chaque zone selon différentes modalités (montée/plat/descente ; portion technique/roulante/obstacle ; largeur)

Nombre et durée des phases de très haute intensité (> PMA)

Bilan :

L'étape 1 nous permet en premier lieu d'obtenir les deux valeurs de référence que nous allons utiliser pour standardiser la suite du protocole.

L'étape 2 nous amène à observer les qualités de répétition d'effort. Mais c'est un effort que nous avons spécifiquement calibré afin d'essayer de se rapprocher des conditions naturelles de pratique. Nous allons alors analyser la PPM afin de voir si l'athlète arrive à conserver sa capacité à produire un effort court et intense, synonyme de bonnes dispositions à faire face à cette demande spécifique en XCO. Le second paramètre à prendre en compte c'est la puissance moyenne que le coureur est capable de créer. L'une des manières de synthétiser la session de test en gommant la variabilité inter-sprint est de regarder la PCR qui représente la production totale qui a été réalisée en fin de test.

L'étape 3 permet de voir la manière dont l'athlète se comporte en situation réelle, lorsqu'il est confronté aux différentes phases d'une course. C'est une façon inédite de mettre en évidence les zones posant un problème pour les travailler à l'entraînement et pouvoir mieux les appréhender ensuite. Cela permet aussi de se rendre compte si le coureur arrive à exploiter les qualités brutes identifiées au laboratoire. L'étude de la nature de ces phases de très haute intensité en est une très bonne illustration.

La combinaison des différents lieux, domaines et techniques d'expertise nous permet de broser le portrait de l'athlète et plus particulièrement de ses caractéristiques reliées à la performance en VTT XCO et de ses spécificités personnelles, afin d'ajuster son entraînement.

7. Conclusion et perspectives

C'est donc la discipline du VTT XCO qui a constitué l'objet de nos recherches. Nous avons pu voir que ce sport a subi de grandes évolutions (aussi bien règlementaires que technologiques) durant la dernière décennie et qu'il a été relativement peu étudié depuis le « basculement » dans son format plus moderne. C'est pourquoi nous nous sommes intéressé à la performance en XCO et à ses multiples facteurs d'influences. La pluralité des déterminants nous a amené notamment à découvrir et à présenter des aspects biomécaniques, physiologiques et technologiques qui impactent chacun à leur manière la performance.

L'interaction homme-matériel prend également une place importante au sein de la pratique car du matériel spécifique est utilisé. C'est pour cela que nous nous sommes questionnés sur la pertinence de l'utilisation de vélo de route par les vététistes pour des sessions particulières de travail. Or nous n'avons pas montré de différences au niveau de l'efficacité du pédalage selon le matériel. Dans le but d'identifier et de comprendre ce mécanisme, il serait intéressant de mettre en place une étude comprenant des acquisitions cinétiques, une analyse cinématique et des mesures électromyographiques combinées. En effet, ces différents types d'approche ont déjà permis d'apporter de nombreuses informations concernant les paramètres du pédalage.

Une comparaison de la cinématique de pédalage entre le vélo de route et le vélo tout-terrain a même été réalisée, mais elle n'a pas montré de différences significatives entre les disciplines (Carpes et al., 2006). Cependant, l'utilisation de la cinématique et des forces de pédalage ont permis d'établir les caractéristiques liées à l'utilisation de différentes formes de pédalier (rond ou ovale) (Strutzenberger et al., 2012). Une étude a même montré que les changements d'inclinaison du tronc affectaient le recrutement musculaire et la cinématique articulaire (Savelberg et al., 2003).

Les orientations futures

Tout ceci nous encourage à orienter les futures études vers la combinaison de ces domaines de recherche, et pourquoi pas en les regroupant au travers de la modélisation numérique. En se servant de modèles neuro-musculo-squelettiques des membres inférieurs (Arnold et al., 2010) que nous alimenterions avec une mesure précise de la gestuelle, de l'activité musculaire et des mesures de la force appliquée aux pédales, cela permettrait l'estimation de la contribution respective de chacun des muscles impliqués dans le pédalage. Ainsi cela ouvrirait la porte à une identification des divers mécanismes d'adaptations que nous avons mis en évidence. Ces observations sont génériques et peuvent être intéressantes pour l'ensemble des athlètes, mais il ne faut pas oublier que certains d'entre eux présentent des spécificités, comme nous avons pu le constater, et qu'il faut faire attention à ces différences inter-individuelles.

Il faudra donc à l'avenir prendre en compte les particularités des vététistes dans l'établissement des diagnostics et dans le suivi de performance, mais également approfondir cette identification de profils. Les premiers résultats concernant l'attitude sur la selle ou la gestion énergétique ayant révélé des résultats prometteurs, cela nous pousse à explorer encore plus. Et cela, afin de voir si les profils comportementaux observés se répètent bien et permettent une catégorisation pouvant aider à cibler les besoins et orienter la préparation. Malgré cette volonté de personnalisation, le cadre de la discipline (et plus encore le contexte de compétition) impose un certain nombre de contraintes immuables, au premier rang desquelles on retrouve le type d'effort.

En effet, la nature des sollicitations et de la dynamique de course, que nous avons pu observer et confirmer dans le cadre de notre travail, révèle l'importance pour les coureurs d'être capable de faire face à de nombreux efforts courts mais très sollicitants. Il serait donc intéressant de tester l'effet sur la performance d'un entraînement axé spécifiquement sur l'endurance à la répétition d'efforts de haute intensité. Tout d'abord, il serait cohérent de systématiser l'utilisation de protocoles intermittents pour les tests d'efforts des athlètes, afin de se rapprocher un peu plus de la réalité de leur pratique. Par la suite, la mise en application d'un protocole spécifique d'essai suivant les recommandations que nous avons effectuées semble un premier pas vers une meilleure appréhension de la discipline du VTT XCO moderne.

Bibliographie

- Abbiss, C. R., Peiffer, J., & Laursen, P. B. (2009). Optimal cadence selection during cycling. *International SportMed Journal*, 10(1), 1-15.
- Abbiss, C. R., Quod, M. J., Martin, D. T., Netto, K. J., Nosaka, K., Lee, H., ... Laursen, P. B. (2006). Dynamic pacing strategies during the cycle phase of an ironman triathlon. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 38(4), 726-734.
- Abbiss, C. R., Ross, M. L. R., Garvican, L. A., Ross, N., Pottgiesser, T., Gregory, J., & Martin, D. T. (2013). The distribution of pace adopted by cyclists during a cross-country mountain bike World Championships. *Journal of Sports Sciences*, 31(7), 787-794.
- Arimoto, M., Kijima, A., & Muramatsu, S. (2005). Cardiorespiratory response to dynamic and static leg press exercise in humans. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*, 24(4), 277-283.
- Arnold, E. M., Ward, S. R., Lieber, R. L., & Delp, S. L. (2010). A Model of the Lower Limb for Analysis of Human Movement. *Annals of Biomedical Engineering*, 38(2), 269-279.
- Arrêté du 8 décembre 1995 modifié par l'arrêté du 19 février 1997 (Ministère de la Jeunesse et des sports). Consulté à l'adresse http://beesacvpa.free.fr/reglementation/docs/19951208_arrete_vtt_cvl_clsh.pdf
- Bangsbo, J., Iaia, F. M., & Krstrup, P. (2007). Metabolic response and fatigue in soccer. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2(2), 111-127.
- Baron, R. (2001). Aerobic and anaerobic power characteristics of off-road cyclists. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(8), 1387-1393.

- Bejder, J., Bonne, T. C., Nyberg, M., Sjøberg, K. A., & Nordsborg, N. B. (2018). Physiological determinants of elite mountain bike cross-country Olympic performance. *Journal of Sports Sciences*, 1-8.
- Belluye, N., & Cid, M. (2001). Approche biomécanique du cyclisme moderne, données de la littérature. *Science & Sports*, 16, 71-87.
- Bernard, T., Hausswirth, C., Le, Y. M., Bignet, F., Dorel, S., & Brisswalter, J. (2009). Distribution of power output during the cycling stage of a Triathlon World Cup. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 41(6), 1296-1302.
- Billat, V., & Koralsztein, J. P. (1996). Significance of the velocity at. *Sports Med*, (2). Consulté à l'adresse
https://www.researchgate.net/profile/Veronique_Billat/publication/257901605_Significance_of_the_Velocity_at_OV0312O2max_and_Time_to_Exhaustion_at_this_Velocity/links/56fd2e3d08ae3c85c0c9bd3d.pdf
- Billat, V. L. (2013). *VO2 max à l'épreuve du temps: Pour une nouvelle vision de l'entraînement*. De Boeck Supérieur.
- Bini, R. R., Hume, P., Croft, J. L., & Kilding, A. (2013). Pedal force effectiveness in cycling: A review of constraints and training effects. *Journal of Science Cycling*, 2(1), 11-24.
- Blitz, P. S., Hoogstraten, J., & Mulder, G. (1970). Mental load, heart rate and heart rate variability. *Psychologische Forschung*, 33(4), 277-288.
- Brisswalter, J., Hausswirth, C., Smith, D., Vercruyssen, F., & Vallier, J. M. (2000). Energetically optimal cadence vs. freely-chosen cadence during cycling: effect of exercise duration. *International Journal of Sports Medicine*, 21(1), 60-64.

- Busko, K. (2007). Economical and optimal pedalling velocity characteristics during maximal and submaximal efforts on cycloergometer. *Biology of Sport*, 24(3), 209-226.
- Carpes, F., Dagnese, F., Bini, R., Diefenthaler, F., Rossato, M., Mota, C. B., & Guimaraes, A. C. S. (2006). Características cinemáticas da pedalada em ciclistas competitivos de diferentes modalidades. Consulté à l'adresse <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/67106>
- Chabroux, V. (2010). *Approche aérodynamique et biomécanique de l'amélioration des performances de cyclistes en course contre la montre.*
- Childers, W. L., Kistenberg, R. S., & Gregor, R. J. (2009). The biomechanics of cycling with a transtibial amputation: Recommendations for prosthetic design and direction for future research. *Prosthetics and Orthotics International*, 33(3), 256-271.
- Cormery, B., Marcil, M., & Bouvard, M. (2008). Rule change incidence on physiological characteristics of elite basketball players: a 10-year-period investigation. *British Journal of Sports Medicine*, 42(1), 25-30.
- Costa, V., & Fernando, D. O. (2008). Physiological variables to predict performance in cross-country mountain bike races. *Journal of Exercise Physiology Online*, 11(6). Consulté à l'adresse <http://racepace.com.br/uploads/artigos/physiological-variables-to-predict-performance-in-cross-country-mountain-bike-races.pdf>
- Coyle, E. F. (1998). Cardiovascular drift during prolonged exercise and the effects of dehydration. *International Journal of Sports Medicine*, 19 Suppl 2, S121-124.
- Coyle, E. F., Feltner, M. E., Kautz, S. A., Hamilton, M. T., Montain, S. J., Baylor, A. M., ... Petrek, G. W. (1991). Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 23(1), 93-107.

- Davison, R. C., Swan, D., Coleman, D., & Bird, S. (2000). Correlates of simulated hill climb cycling performance. *Journal of Sports Sciences, 18*(2), 105-110.
- Dean, E. (1988). Physiology and therapeutic implications of negative work. A review. *Physical Therapy, 68*(2), 233-237.
- Dorel, Couturier, A., & Hug, F. (2009). Influence of different racing positions on mechanical and electromyographic patterns during pedalling. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 19*(1), 44-54.
- Dorel, S., Bourdin, M., Van Praagh, E., Lacour, J.-R., & Hautier, C. A. (2003). Influence of two pedalling rate conditions on mechanical output and physiological responses during all-out intermittent exercise. *European Journal of Applied Physiology, 89*(2), 157-165.
- Ericson, M. O., & Nisell, R. (1988). Efficiency of Pedal Forces During Ergometer Cycling. *International Journal of Sports Medicine, 9*, 118-122.
- Faria, E. W., Parker, D. L., & Faria, I. E. (2005). The Science of Cycling - Factors Affecting Performance - Part 2. *Sports Medicine, 35*(4), 313-337.
- Fornasiero, A., Savoldelli, A., Modena, R., Boccia, G., Pellegrini, B., & Schena, F. (2017). Physiological and anthropometric characteristics of top-level youth cross-country cyclists. *Journal of Sports Sciences, 36*, 1-6.
- Fox, S. M., & Haskell, W. L. (1968). Physical activity and the prevention of coronary heart disease. *Bulletin of the New York Academy of Medicine, 44*(8), 950-965.
- Fritzche, R. G., Switzer, T. W., Hodgkinson, B. J., Lee, S.-H., Martin, J. C., & Coyle, E. F. (2000). Water and carbohydrate ingestion during prolonged exercise increase maximal neuromuscular power. *Journal of Applied Physiology, (88)*, 730-737.

- García-López, J., Díez-Leal, S., Ogueta-Alday, A., Larrazabal, J., & Rodríguez-Marroyo, J. A. (2016). Differences in pedalling technique between road cyclists of different competitive levels. *Journal of Sports Sciences, 34*(17), 1619-1626.
- Garside, I., & Doran, D. A. (2000). Effects of bicycle frame ergonomics on triathlon 10-km running performance. *Journal of Sports Sciences, 18*(10), 825-833.
- Granier, C., Abbiss, C. R., Aubry, A., Vauchez, Y., Dorel, S., Hauswirth, C., & Le Meur, Y. (2018). Power Output and Pacing During International Cross-Country Mountain Bike Cycling. *International Journal of Sports Physiology and Performance, 1*-22.
- Grappe, F. (2009). *Cyclisme et optimisation de la performance - Sciences et méthodologie de l'entraînement*. De Boeck Supérieur.
- Gregory, J. (2002). *The Physiological and Physical Determinants of Mountain Bike Cross Country Cycling*.
- Gregory, J., Johns, D. P., & Walls, J. T. (2007). Relative vs. absolute physiological measures as predictors of mountain bike cross-country race performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 21*(1), 17-22.
- Gullstrand, L. (1994). Blood sampling during continuous running and 30-second intervals on treadmill. *Scand J Med Sci Sports, 4*, 239-242.
- Hill, A. V., Long, C. N. H., & Lupton, H. (1924). Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilisation of oxygen.—Parts I-III. *Proc. R. Soc. Lond. B, 96*(679), 438-475.
- Hurst, H. T., & Atkins, S. (2006). Power output of field-based downhill mountain biking. *Journal of Sports Sciences, 24*(10), 1047-1053.
- Hurst, H. T., Swarén, M., Hébert-Losier, K., Ericsson, F., Sinclair, J., Atkins, S., & Holmberg, H.-C. (2012). Influence of course type on upper body muscle activity in elite Cross-Country

- and Downhill mountain bikers during off Road Downhill Cycling. *Journal of Science and Cycling*, 1(2), 2.
- Hurst, H. T., Swarén, M., Hébert-Losier, K., Ericsson, F., Sinclair, J., Atkins, S., & Homlberg, H.-C. (2013). GPS-Based Evaluation of Activity Profiles in Elite Downhill Mountain Biking and the Influence of Course Type. *Journal of Science and Cycling*, 2(1), 25.
- Impellizzeri, F. M., & Marcora, S. M. (2007). The Physiology of Mountain Biking: *Sports Medicine*, 37(1), 59-71.
- Impellizzeri, F. M., Marcora, S. M., Rampinini, E., Mognoni, P., & Sassi, A. (2005). Correlations between physiological variables and performance in high level cross country off road cyclists. *British Journal of Sports Medicine*, 39(10), 747-751.
- Impellizzeri, F., Sassi, A., Rodriguez-Alonso, M., Mognoni, P., & Marcora, S. (2002). Exercise intensity during off-road cycling competitions. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34(11), 1808-1813.
- Inoue, A., S. Sá Filho, A., C. M. Mello, F., & M. Santos, T. (2012). Relationship Between Anaerobic Cycling Tests and MTB performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(6), 1589-1593.
- Kautz, S. A., Feltner, M. E., Coyle, E. F., & Baylor, A. M. (1991). The Pedaling Technique of Elite endurance cyclists Changes with increasing workload at constant cadence. *International Journal of Sport Biomechanics*, 7, 29-53.
- Korff, T., Romer, L. M., Mayhew, I., & Martin, J. C. (2007). Effect of Pedaling Technique on Mechanical Effectiveness and Efficiency in Cyclists. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 991-995.

- Lacour, J. R., & Flandrois, R. (1977). Role of aerobic metabolism in prolonged intensive exercise. *Journal De Physiologie*, 73(2), 89-130.
- Lafortune, M. A., & Cavanagh, P. R. (1983). Effectiveness and Efficiency during Bicycle Riding. *International Series on Biomechanics*, (928-936).
- Lee, H., Martin, D. T., Anson, J. M., Grundy, D., & Hahn, A. G. (2002). Physiological characteristics of successful mountain bikers and professional road cyclists. *Journal of Sports Sciences*, 20(12), 1001-1008.
- Lepers, R., Maffiuletti, N. A., & Millet, G. (2002). Étiologie et cinétique d'apparition de la fatigue neuromusculaire lors d'exercices prolongés de cyclisme. *Movement & Sport Sciences*, no 52(2), 83-107.
- Luciá, A., Hoyos, J., Carvajal, A., & Chicharro, J. L. (1999). Heart rate response to professional road cycling: the Tour de France. *International Journal of Sports Medicine*, 20(3), 167-172.
- Macdermid, P. W., Fink, P. W., & Stannard, S. R. (2015). The Effects of Vibrations Experienced during Road vs. Off-road Cycling. *International Journal of Sports Medicine*, 36(10), 783-788.
- Macdermid, Paul W., Fink, P. W., & Stannard, S. R. (2014). Transference of 3D accelerations during cross country mountain biking. *Journal of Biomechanics*, 47(8), 1829-1837.
- Macdermid, Paul W., Miller, M. C., Fink, P. W., & Stannard, S. R. (2017). The effectiveness of front fork systems at damping accelerations during isolated aspects specific to cross-country mountain biking. *Sports Biomechanics*, 16(4), 527-539.

- Macdermid, Paul William, Fink, P. W., & Stannard, S. R. (2015). The influence of tyre characteristics on measures of rolling performance during cross-country mountain biking. *Journal of Sports Sciences, 33*(3), 277-285.
- Macdermid, Paul William, & Stannard, S. (2012). Mechanical work and physiological responses to simulated cross country mountain bike racing. *Journal of Sports Sciences, 30*(14), 1491-1501.
- MacRae, H. S.-H., Hise, K. J., & Allen, P. J. (2000). Effects of front and dual suspension mountain bike systems on uphill cycling performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise, 32*(7), 1276–1280.
- Matveiev, L. P. (1983). *Aspect fondamentaux de l'entraînement* (Vigot). Paris.
- McLellan, T. M. (1985). Ventilatory and plasma lactate response with different exercise protocols: a comparison of methods. *International journal of sports medicine, 6*(01), 30–35.
- Mehta, R. K., & Agnew, M. J. (2012). Influence of mental workload on muscle endurance, fatigue, and recovery during intermittent static work. *European Journal of Applied Physiology, 112*(8), 2891-2902.
- Menard, M., Domalain, M., Decatoire, A., & Lacouture, P. (2016). Influence of saddle setback on pedalling technique effectiveness in cycling. *Sports Biomechanics, 15*(4), 462-472.
- Mieras, M. E., Heesch, M. W. S., & Slivka, D. R. (2014). Physiological and psychological responses to outdoor vs. laboratory cycling. *Journal of Strength and Conditioning Research, 28*(8), 2324-2329.
- Miller, M. C., & Macdermid, P. W. (2015). Predictive Validity of Critical Power The Onset of Blood Lactate and Anaerobic Capacity For Cross-Country Mountain Bike Race Performance. *Sports and Exercise Medicine, 1*(4), 105-110.

- Millet, G. Y., Millet, G. P., Lattier, G., Maffiuletti, N. A., & Candau, R. (2003). Alteration of neuromuscular function after a prolonged road cycling race. *International Journal of Sports Medicine, 24*(3), 190-194.
- Muyor, J. M., & Zabala, M. (2016). Road Cycling and Mountain Biking Produces Adaptations on the spine and hamstrings extensibility. *International Journal of Sports Medicine, 37*, 43-49.
- Nielens, H., & Lejeune, T. (2004). Bicycle shock absorption systems and energy expended by the cyclist. *Sports Medicine, 34*(2), 71–80.
- Nishii, T., Umemura, Y., & Kitagawa, K. (2004). Full suspension mountain bike improves off-road cycling performance. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness, 44*(4), 356-360.
- Novak, A. R., & Dascombe, B. J. (2014). Physiological and performance characteristics of road, mountain bike and BMX cyclists. *Journal of Science and Cycling, 3*(3), 9-16.
- Padilla, S., Mujika, I., Orbañanos, J., & Angulo, F. (2000). Exercise intensity during competition time trials in professional road cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 32*(4), 850-856.
- Palmer, G. S., Borghouts, L. B., Noakes, T. D., & Hawley, J. A. (1999). Metabolic and performance responses to constant-load vs. variable-intensity exercise in trained cyclists. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985), 87*(3), 1186-1196.
- Panascì, M., Lepers, R., La Torre, A., Bonato, M., & Assadi, H. (2017). Physiological responses during intermittent running exercise differ between outdoor and treadmill running. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism = Physiologie Appliquee, Nutrition Et Metabolisme, 42*(9), 973-977.

- Patterson, R. P., & Moreno, M. I. (1990). Bicycle pedaling forces as a function of pedaling rate and power output. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 22(4), 512-516.
- Phillips, S., Levy, M., Alumbaugh, B., Smith, G., & Smitn, G. (2014). The effect of wheel diameter on vertical and horizontal mountain bike position. *Journal of Science and Cycling*, 3(2), 42.
- Platonov, V. N. (1988). *L'entraînement sportif : théorie et méthodologie* (Ed. Revue EPS). Paris.
- Prins, L., Terblanche, E., & Myburgh, K. H. (2007). Field and laboratory correlates of performance in competitive cross-country mountain bikers. *Journal of Sports Sciences*, 25(8), 927-935.
- Raasch, C. C., & Zajac, F. E. (1999). Locomotor Strategy for Pedaling Muscle Groups and Biomechanical. *Journal of Neurophysiology*, 82, 515-525.
- Règlementation UCI 2018. (s. d.). Consulté 26 juin 2018, à l'adresse <http://www.uci.ch/inside-uci/rules-and-regulations/regulations/>
- Reilly, T., Bangsbo, J., & Franks, A. (2000). Anthropometric and physiological predispositions for elite soccer. *Journal of Sports Sciences*, 18(9), 669-683.
- Reilly, Thomas, Morris, T., & Whyte, G. (2009). The specificity of training prescription and physiological assessment: a review. *Journal of Sports Sciences*, 27(6), 575-589.
- Riboli, A., Cè, E., Rampichini, S., Venturelli, M., Alberti, G., Limonta, E., ... Esposito, F. (2017). Comparison between continuous and discontinuous incremental treadmill test to assess velocity at $\dot{V}O_2\text{max}$. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 57(9), 1119-1125.

- Rossato, M., Bini, R. R., Carpes, F. P., Diefenthaler, F., & Moro, A. R. P. (2008). Cadence and workload effects on pedaling technique of well-trained cyclists. *International Journal of Sports Medicine, 29*(9), 746-752.
- Rouffet, D. M., & Hautier, C. A. (2008). EMG normalization to study muscle activation in cycling. *Journal of Electromyography and Kinesiology, 18*(5), 866-878.
- Rylands, L. P., Roberts, S. J., & Hurst, H. T. (2015). Variability in Laboratory vs. Field Testing of Peak Power, Torque, and Time of Peak Power Production Among Elite Bicycle Motocross Cyclists. *Journal of Strength and Conditioning Research, 29*(9), 2635-2640.
- Saltin, B., & Astrand, P. O. (1967). Maximal oxygen uptake in athletes. *Journal of Applied Physiology, 23*(3), 353-358.
- Sanders, D., Myers, T., & Akubat, I. (2017). Training-Intensity Distribution in Road Cyclists: Objective Versus Subjective Measures. *International Journal of Sports Physiology and Performance, 12*(9), 1232-1237.
- Sanderson. (2003). BikeTech - The Biomechanics of Cycling.
- Sanderson, D. J. (1991). The influence of cadence and Power Output on the biomechanics of force application during steady-rate cycling in competitive and recreational cyclists. *Journal of Sport Science, 9*, 191-203.
- Savelberg, H. H. C. M., Van de Port, I. G. L., & Willems, P. J. B. (2003). Body Configuration in Cycling Affects Muscle Recruitment and Movement Pattern. *Journal of Applied Biomechanics, 19*(4), 310-324.
- Schaffert, N., Godbout, A., Schlueter, S., & Mattes, K. (2017). Towards an application of interactive sonification for the forces applied on the pedals during cycling on the Wattbike ergometer. *Displays, 50*, 41-48.

- Site Officiel FFC. (s. d.). Consulté 2 juillet 2018, à l'adresse <https://www.ffc.fr/presentation-vtt/>
- Skals, S. L., Bendtsen, K. M., Andreassen, J. J., & Rasmussen, K. P. (2013). Utilizing 29" wheels reveals superior performance compared with 26" wheels in cross-country mountain bike. Consulté à l'adresse <http://vbn.aau.dk/ws/files/76959054/Artikel.pdf>
- Smith, M. F., Davison, R. C., Balmer, J., & Bird, S. R. (2001). Reliability of mean power recorded during indoor and outdoor self-paced 40 km cycling time-trials. *International Journal of Sports Medicine*, 22(4), 270-274.
- Stapelfeldt, B., Schwirtz, A., Schumacher, Y. O., & Hillebrecht, M. (2004). Workload Demands in Mountain Bike Racing. *International Journal of Sports Medicine*, 25(4), 294-300.
- Steiner, T., Müller, B., Maier, T., & Wehrin, J. P. (2016). Performance differences when using 26- and 29-inch-wheel bikes in Swiss National Team cross-country mountain bikers. *Journal of Sports Sciences*, 34(15), 1438-1444.
- Strutzenberger, G., Wunsch, T., Kröll, J., & Schwameder, H. (2012). Pedal forces, lower limb joint kinematics and kinetics in cycling with circular and non-circular chainrings. *ISBS - Conference Proceedings Archive*, 1(1). Consulté à l'adresse <https://ojs.ub.uni-konstanz.de/cpa/article/view/5259>
- Ting, L. H., Kautz, S. A., Brown, D. A., & Zajac, F. E. (2000). Contralateral movement and extensor force generation alter flexion phase muscle coordination in pedaling. *Journal of Neurophysiology*, 83(6), 3351-3365.
- Titlestad, J., Fairlie-Clarke, T., Whittaker, A., Davie, M., Watt, I., & Grant, S. (2006). Effect of suspension systems on the physiological and psychological responses to sub-maximal biking on simulated smooth and bumpy tracks. *Journal of Sports Sciences*, 24(2), 125-135.

- Too, D. (1994). The effect of trunk angle on power production in cycling. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 65(4), 308-315.
- Verma, R., Hansen, E. A., de Zee, M., & Madeleine, P. (2016). Effect of seat positions on discomfort, muscle activation, pressure distribution and pedal force during cycling. *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, 27, 78-86.
- Viana, B. F., Pires, F. O., Inoue, A., & Santos, T. M. (2018). Pacing Strategy During Simulated Mountain Bike Racing. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(2), 208-213.
- Washburn, R. A., & Seals, D. R. (1983). Comparison of continuous and discontinuous protocols for the determination of peak oxygen uptake in arm cranking. *European Journal of Applied Physiology*, (51), 3-6.
- Weineck, J. (1997). *Manuel d'entraînement : physiologie de la performance sportive et de son développement dans l'entraînement de l'enfant et de l'adolescent* (Vigot). Paris.
- Wilber, R. L., Zawadzki, K. M., Kearney, J. T., Shannon, M. P., & Disalvo, D. (1997). Physiological profiles of elite off-road and road cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 29(8), 1090-1094.
- Zameziati, K., Mornieux, G., Rouffet, D., & Belli, A. (2006). Relationship between the increase of effectiveness indexes and the increase of muscular efficiency with cycling power. *European Journal of Applied Physiology*, 96(3), 274-281.

Annexes

A. Article scientifique : Comprendre les exigences physiologiques du format de course du vélo tout-terrain cross-country olympique (VTT XCO)

Titre original de l'article : *Understanding the Physiological Requirements of the Mountain Bike Cross-Country Olympic Race Format*

État : Publié le 9 Août 2018, dans la revue internationale *Frontiers in Physiology*, au sein de la section *Exercise Physiology*. Il s'agit de l'article indexé n°1062 du Volume 9.

Citation : *Hays A, Devys S, Bertin D, Marquet L-a and Brisswalter J (2018) Understanding the Physiological Requirements of the Mountain Bike Cross-Country Olympic Race Format. Front. Physiol. 9:1062. doi: 10.3389/fphys.2018.01062*

Résumé :

Objectif : Évaluer les exigences physiologiques imposées par le format actuel du VTT XCO (Cross-Country Olympique).

Méthode : 16 cyclistes de cross-country de niveau national ou international ont participé à cette étude. Tous les sujets ont pris part à une course simulée et à une course officielle sur un circuit accrédité. Les valeurs de consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) et de fréquence cardiaque (FC), respectivement exprimées en $\% \dot{V}O_{\max}$ et $\%HR_{\max}$, ont été divisées en trois zones d'intensité physiologique. La première zone (Z1) était la région physiologique sous SV1, la deuxième zone (Z2) correspondait à une région entre SV1 et SV2, et la troisième zone (Z3) était située entre SV2 et $VO_{2\max}$. Pour la puissance de sortie, une quatrième zone supplémentaire a été considérée au-dessus de la puissance aérobie maximale (PMA).

Résultats : Dans le format XCO actuel, $37,0 \pm 17,9\%$ de la course se déroule au-dessus du deuxième seuil ventilatoire à une intensité moyenne de $87\% \dot{V}O_{2max}$ et 25% de la course s'est déroulée au-dessus de PMA. Cette contribution a varié d'un tour à l'autre, avec une très forte intensité au premier tour et des tours plus aérobiques par la suite. La plupart des périodes au-delà de la PMA ont oscillé entre 0 et 10 secondes. Entre ces courtes poussées répétées, des périodes d'exercice de faible intensité ont été enregistrées.

Conclusion : Le format de course XCO actuel est un exercice acyclique et intermittent comparable à certains sports d'équipe à haute intensité. De plus, nos résultats soulignent la pertinence des valeurs de $\dot{V}O_2$ pour l'analyse de la performance en XCO en plus des données HR et/ou de puissance de sortie couramment utilisées.

Mots-clefs : Vélo tout-terrain, consommation maximale d'oxygène, puissance développée, acyclique, suivi de performance, cross-country Olympique (XCO), fréquence cardiaque



Understanding the Physiological Requirements of the Mountain Bike Cross-Country Olympic Race Format

Arnaud Hays^{1*}, Simon Devys¹, Denis Bertin¹, Laurie-anne Marquet¹ and Jeanick Brisswalter²

¹ Institut des Sciences du Mouvement, Aix-Marseille Université, Marseille, France, ² Université Côte d'Azur, LAMHES, Nice, France

Objectives: To evaluate the physiological requirements imposed by the current mountain biking Cross-Country Olympic (XCO) format.

Methods: Sixteen Cross-Country cyclists competing at national or international level participated in this study. All participants completed a simulated and a real official race on a cycling-accredited race track. Oxygen consumption ($\dot{V}O_2$) and heart rate (HR) values expressed as $\% \dot{V}O_{2max}$ and $\%HR_{max}$, respectively, were divided into three physiological intensity zones. The first zone (Z1) was the physiological region below VT1, the second zone (Z2) corresponded to a region between VT1 and VT2, and the third zone (Z3) was located between VT2 and VO_{2max} . For power output, an additional fourth zone was considered above maximal aerobic power (MAP).

Results: When competing in the current XCO format, $37.0 \pm 17.9\%$ of the race is performed above the second ventilatory threshold at a mean intensity of $87\% \dot{V}O_{2max}$ and 25% of the race was spent above MAP. This contribution varied between laps, with a very high intensity during the first lap and more aerobic subsequent laps. The durations of most of the periods beyond MAP oscillated between 5 and 30 s. Between these short, repeated bursts, low-intensity periods of exercise were recorded.

Conclusion: The current XCO race format is an acyclical and intermittent exercise comparable to high-intensity team sports. Moreover, our results highlight the relevance of $\dot{V}O_2$ values when analyzing XCO performance, they should be combined with commonly used HR and/or power output data.

Keywords: off-road cycling, maximal oxygen uptake, power output, acyclical, performance monitoring, XCO mountain bike, heart rate

OPEN ACCESS

Edited by:

Robert James Aughey,
Victoria University, Australia

Reviewed by:

Laurent Mouro,
Université Bourgogne
Franche-Comté, France
Vincent Martin,
Université Clermont Auvergne, France

*Correspondence:

Arnaud Hays
arnaud.hays@univ-amu.fr

Specialty section:

This article was submitted to
Exercise Physiology,
a section of the journal
Frontiers in Physiology

Received: 30 January 2018

Accepted: 17 July 2018

Published: 09 August 2018

Citation:

Hays A, Devys S, Bertin D,
Marquet L-a and Brisswalter J (2018)
Understanding the Physiological
Requirements of the Mountain Bike
Cross-Country Olympic Race Format.
Front. Physiol. 9:1062.
doi: 10.3389/fphys.2018.01062

INTRODUCTION

Since cross-country mountain biking (XCO) was first recognized as an Olympic sport in 1996, the discipline has significantly evolved. In particular, in 2007 the race duration was reduced from 2 h 30 to 1 h 30 while increasing the technical constraints. Current Union Cycliste Internationale (UCI) rules require Olympic cross-country XCO events to feature a lap length of 4–6 km, a race time of around 1 h 30–1 h 45 and a variety of terrains, from forest-style tracks to gravel paths, and include numerous jumps, climbs and descents (UCI Regulations, 2018).

Most previous scientific studies on the discipline were conducted before 2007 (Gregory, 2002; Impellizzeri et al., 2002; Lee et al., 2002; Stapelfeldt et al., 2004; Impellizzeri and Marcora, 2007). Results from several studies indicated that aerobic power ($\dot{V}O_{2\max}$) and maximal aerobic power output (MAP) correlated strongly with mountain bike XCO competition performance ($r = 0.6\text{--}0.9$) (Impellizzeri, 2005; Gregory et al., 2007; Prins et al., 2007). However, Impellizzeri (2005) reported that only $\sim 40\%$ of the variance in performance could be explained by these physiological parameters and the remainder was unexplained. More recently, Inoue et al. (2012) examined the correlation between XCO race time and anaerobic power using a Wingate test. Their results suggested that anaerobic power is also an important determinant of performance in competitive XCO ($r = -0.79$). Furthermore, for complex intermittent sports like mountain biking, the physiological demand of the race is difficult to assess in laboratory conditions (Reilly et al., 2009). Field-based methods are therefore better suited to assess the variability of the demands of XCO form, which is characterized by an explosive rhythm at the start of the race, followed by intermittent bursts (Stapelfeldt et al., 2004), high variability in power, direction, speed and cadence in the different portions of each lap and the role played by upper body muscles in resisting vibrations during downhill sections (Hurst and Atkins, 2006).

In most studies examining simulated races performed in an ecological context, XCO characteristics were described using smoothed heart rate (HR) and power output data (Stapelfeldt et al., 2004; Gregory et al., 2007), with little regard for the intermittent nature of the mechanical workload required for different parts of the race. More recently, Viana et al. (2018) and Granier et al. (2018) examined pacing strategies during the different laps of the current XCO format during either simulated (Viana et al., 2018) or real races (Granier et al., 2018). Their results indicated that all cyclists adopt similar pacing strategies between laps, using a fast-start pacing strategy followed by an even pace.

To the best of our knowledge, only one study examined metabolic response during the current XCO race format in an ecological context of simulated cross-country mountain bike racing (Macdermid and Stannard, 2012). This study was conducted with nationally competitive cross-country mountain bike cyclists, and its authors indicated that, during one simulated race-paced lap, the mechanical work produced and the physiological responses were highly variable. This variability is due to the diverse terrain and pacing characteristics, including high-intensity and low-speed pedaling phases during climbing, and high attentional stress during downhill sections presenting technical difficulties. To better define optimal training guidelines for XCO athletes, scientists and coaches need more data on the true requirements of competition with further analysis of the dynamics of the physiological and mechanical responses throughout the race, based on study of several laps and a race time close to that of real competitions.

This study aimed to describe the mechanical and physiological characteristics of this discipline during a full-length simulated race. Specifically, variations in physiological responses and power

output were analyzed between laps and uphill or downhill sections. Our initial hypothesis was that modern XCO is a cycling discipline displaying acyclical behavior that leads to specific physiological and mechanical constraints that could differ between laps.

MATERIALS AND METHODS

Participants

The participants of this study were 16 male juniors or U23 mountain bike cyclists all competing at national or international level [Age: 17.4 years (range: 15–23); maximal oxygen consumption: $64.6 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ (range: 60.3–72.1); and MAP: $5.2 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ (range: 4.3–5.6)]. All participants had signed a contract with a team. The contracts include clauses relating to a partnership with the laboratory for collaboration in experiments for data collection (for minors, all contracts were countersigned by parents). The study protocol complied with the standards set out in the Declaration of Helsinki, all participants were volunteers and all experimental procedures were approved by the Local Research Ethics Committee.

Experimental Design

All the participants took part in two XCO races separated by 1 month. The first race was an official competition that was used as reference for run time. The second was a simulated race organized on the same track as the official race.

One week before performing the simulated race, all participants performed a discontinuous incremental protocol on a cycling-ergometer (Lode Excalibur Sport, Groningen, The Netherlands) to assess their maximal oxygen consumption ($\dot{V}O_{2\max}$), MAP, and ventilatory thresholds. This intermittent incremental protocol has previously been used to determine $\dot{V}O_{2\max}$ for middle-distance runners and to calibrate interval-training protocols (Billat et al., 2000). It has also been used to avoid overestimating athletes who may have high anaerobic capacities (Riboli et al., 2017). Expired gases were measured breath-by-breath by a gas analysis system (K5, Cosmed Srl, Rome, Italy). After a 5 min warm-up at 100 W, the power output was increased by 30 W every 2 min. Each stage was followed by a 30 s rest (Washburn and Seals, 1983). $\dot{V}O_{2\max}$ was determined from the four highest $\dot{V}O_2$ values recorded when $\dot{V}O_2$ reached a plateau at the end of the incremental protocol. The $\dot{V}O_2$ plateau was reached when the difference recorded between two consecutive stages was $\leq 150 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ (Taylor et al., 1955). MAP was defined as the power maintained for more than 1 min at the stage which elicited $\dot{V}O_{2\max}$ (Billat and Koralsztein, 1996). The first ventilatory threshold (VT1) was defined as the time at which an initial departure from linearity in expiratory volume (VE) was observed, and when a systematic increase in the ventilatory equivalent for O_2 ($VE/\dot{V}O_2$) and fraction of expired O_2 (FEO_2) first appeared. The second ventilatory threshold (VT2) was defined based on a secondary increase in VE and $VE/\dot{V}O_2$, and a marked increase in the ventilatory equivalent for CO_2 ($VE/\dot{V}CO_2$) combined with a decrease in the fraction of expired CO_2 ($FECO_2$) (McLellan, 1985). HR was

continuously monitored throughout the test using a telemetric HR monitor (Garmin, Switzerland) and the HR sensor of the gas analyzer.

Simulated XCO Competition

The simulated competition was performed on the same accredited cycling track as the official competition. This track was an outdoor track (length = 5.10 km) with uphill and downhill sections (cumulative altitude difference for the entire trial = 215 m). During the simulated race, after a standardized warm-up, two cyclists of similar performance level (based on national ranking) participated in the same run to mimic competitive conditions. Each run consisted of three laps with a 30 s rest period between laps, during which blood samples were drawn (Gullstrand et al., 1994) and participants allowed to drink *ad libitum*. During these periods, cyclists were allowed to remove the mask from the gas analyzer and breathe freely.

Physiological and Mechanical Assessment During the Simulated Competition

Gas exchange (K5, Cosmed Srl, Rome, Italy), HR (Garmin, Ltd, Schaffhausen, Switzerland), power output (Rex1 inpower, Rotor, Madrid, Spain) and GPS position (Garmin Edge 520 Ltd., Schaffhausen, Switzerland) were continuously recorded during all runs (recording frequency 1 Hz, except for gas exchange, which was breath-by-breath). To attenuate variability in breath-by-breath $\dot{V}O_2$ related irregular ventilation, and more specifically in this particular exercise due to vibrations affecting ventilation, breath-by-breath and HR data were processed using a moving average over 10 breaths.

Before the start of the race, between each lap and immediately after the race, fingertip blood samples were collected ($\sim 95 \mu\text{L}$) from all participants. Capillary blood samples were immediately analyzed for bicarbonate (HCO_3^-), pH (iStat clinical analyzer, Abbott Point of Care, East Windsor, NJ, United States), and blood lactate (Lactate Scout, Senslab, Leipzig, Germany).

Power was measured using a Rotor power meter, which is a single-sided power meter measuring power based on output from strain gauges in the left side crank arm. This system was recently compared to a number of portable power meters during road cycling (SRM, Powertap, SRAM Quark, Stages powermeter) and showed a high concurrent validity (standard error estimate: 2 W; Bland Altman 95% Limits of Agreement: $\pm 6\text{W}$ and Intraclass Correlations: 1.00) (Sanders et al., 2017). The power of the Rotor system was calibrated based on the power of the Lode cycling-ergometer. Lap time and overall performance were measured based on GPS values.

Data Analysis

Oxygen consumption ($\dot{V}O_2$) and HR values were expressed as $\% \dot{V}O_{2\text{max}}$ and $\% \text{HR}_{\text{max}}$, respectively, and divided into three physiological intensity zones. The first zone (Z1) was the physiological region below VT1, the second zone (Z2) corresponded to a region between VT1 and VT2, and the third zone (Z3) was located between VT2 and $\dot{V}O_{2\text{max}}$.

Power output measured during the different laps was expressed in % of MAP and divided into four power zones (Bernard et al., 2009): P1 below the power corresponding to VT1, P2 between the power corresponding to VT1 and VT2, P3 between the power above VT2 up to MAP, and P4 for the power above MAP. The efforts exerted during P4 were subdivided into five categories based on their duration: 1–5 s, 6–10 s, 11–15 s, 16–20 s, and longer than 20 s. The duration of each time interval, expressed as a percentage of the total time above MAP, and the number of actions for each time interval were reported. Time spent without pedaling was also assessed, it was classed as a fifth power zone named NP.

Statistical Analysis

All statistical analyses were performed using a statistical software package (STATISTICA for Windows 10; StatSoft, Inc., Tulsa, OK, United States). All data were expressed as mean \pm SD. The correlations between the time spent in each zone expressed in $\% \dot{V}O_{2\text{max}}$ and expressed in %HR and the correlations between the time spent in each zone expressed in $\% \dot{V}O_{2\text{max}}$ and expressed in %MAP, were calculated using the Pearson correlation coefficient. O_2 consumption and HR measured prior to the start of the field trial, and the O_2 , HR, and power output data collected during each of the separate laps were placed in their respective physiological intensity and power zones. Repeated measures ANOVA were performed to test differences between each lap, using the amount of time spent in the physiological and power zones as dependent variables. Repeated ANOVA (period) were performed on lactate, pH, and HCO_3^- values measured before the start of the trial and immediately after each lap. The threshold for statistical significance was set to $p \leq 0.05$. When an effect was observed, the difference between periods was assessed using a Newman-Keuls *post hoc* test. When a difference was identified, the effect size was calculated based on Cohen's d (Sullivan and Feinn, 2012). The effect was ranked small ($d \geq 0.2$), medium ($d \geq 0.5$), or large ($d \geq 0.8$).

RESULTS

Race Parameters

Whatever the group, no significant difference in performance was found between the simulated race and the official competition (simulated run vs. official race: 64 ± 1.5 min vs. 66 ± 2 min). Climatic conditions were comparable for both races, both in terms of average ambient temperature (17°C vs. 19°C) and relative humidity (61% vs. 54%), and the track was therefore in a similar condition.

Physiological Demands

The time spent in each VO_2 zone during the different laps is presented in **Table 1**. Throughout the run, $29.4 \pm 10\%$ of the time was spent below VT1, $33.6 \pm 2.7\%$ was spent in the second zone, and $37.0 \pm 10.9\%$ of the time participants were above VT2. A significant difference between laps was observed in terms of the time spent in Z1 [$F(2,30) = 17.49$, $p < 0.05$] and in Z3 [$F(2,30) = 11.45$, $p < 0.05$]. A moderate increase in time spent

TABLE 1 | Percentage of total time spent in each physiological zone for each lap.

		Z1	Z2	Z3
VO ₂ (%TotalTime)	Lap 1	19.8 ± 15.6*†	31.4 ± 15.6	48.8 ± 15.1*†
	Lap 2	28.7 ± 16.0*‡	36.6 ± 16.5	34.7 ± 15.6*‡
	Lap 3	39.7 ± 13.8†‡	32.9 ± 17.3	27.4 ± 16.0†‡
HR (%TotalTime)	Lap 1	17.1 ± 8.9	53.2 ± 8.6	29.7 ± 6.2
	Lap 2	12.9 ± 11.1	52.5 ± 9.3	34.6 ± 5.7
	Lap 3	15.4 ± 8.4	50.3 ± 12.1	34.2 ± 9.3

Data are presented as mean ± standard deviation, with results of ANOVA comparisons (*significance difference between Lap1 and Lap2; †significance difference between Lap1 and Lap3; ‡significance difference between Lap2 and Lap3).

in the first zone was recorded between the first and second laps ($d = 0.74$), and between the second and third laps ($d = 0.46$). Overall, a large increase of the time spent in Z1 was observed between the first and the third laps ($d = 1.16$). Simultaneously, a large decrease in time spent in Z3 was observed between the first and third laps ($d = 1.07$). For the time spent in the second zone, differences between laps were not significant [$F(2.30) = 0.41$, $p = 0.66$].

Heart Rate

The time spent in each HR zone for the different laps is presented in **Table 1**. Over the whole run, $15.1 \pm 2.1\%$ of the time was spent at a HR corresponding to the zone below VT1, $52.1 \pm 1.5\%$ of the time was spent in the second zone, and $32.8 \pm 2.7\%$ of the time was spent at a HR above that recorded for VT2. No significant difference between laps was observed for the different zones [Z1: $F(2.30) = 1.13$, $p = 0.34$; Z2: $F(2.30) = 0.03$, $p = 0.96$; and Z3: $F(2.30) = 1.02$, $p = 0.38$].

Power Output

The time spent in each power output zone for the different laps is presented in **Table 2**. Throughout the run, participants spent $19.2 \pm 5.0\%$ of the time at NP, $30.6\% \pm 9.4\%$ at P1, $12.6 \pm 5.0\%$ at P2, $9.4 \pm 4.6\%$ at P3 and $28.2 \pm 8.1\%$ at P4. A significant difference between laps was observed only for time spent in the P4 zone [$F(2.30) = 3.67$, $p = 0.03$], with a measureable decrease between the first and second laps ($d = 0.62$), and a smaller decrease between the second and third lap ($d = 0.41$). As a result, a large effect was found between the first and third laps ($d = 1.00$). For the time spent in the other zones, differences between laps were not significant [NP: $F(2.30) = 0.16$, $p = 0.85$; P1: $F(2.30) = 1.61$, $p = 0.21$; P2: $F(2.30) = 0.30$, $p = 0.74$; P3: $F(2.30) = 0.09$, $p = 0.92$]. However, it should be noted that the average time spent in P1 increased with each lap, and concomitantly, the time spent in P4 decreased; times for NP, P2, and P3 remained stable across all laps.

For the P4 zone, a significant effect was observed on the percentage of total time spent in the different 5 s durations over which the effort exerted exceeded MAP [$F(4.180) = 24.24$, $p < 0.05$]. The time spent above MAP most frequently lasted 5–10 s as compared to other maintenance durations (i.e., 1–5 s, 11–15 s, 16–20 s and more than 20 s; $d = 1.28$; $d = 1.23$, $d = 1.57$, $d = 2.07$, respectively) (**Figure 1A**). A significant effect

was also observed for the number of actions performed in P4 [$F(4.180) = 24.24$, $p < 0.05$]. The number of efforts in the 1–5 s time category ($n = 22.1$, representing almost 50% of efforts in P4) was significantly higher than each of the other four categories ($d = 2.48$, $d = 3.71$, $d = 4.91$, $d = 5.51$, respectively) (**Figure 1B**).

Blood Analysis

Mean lactate concentration in pre-exercise was $1.9 \pm 0.5 \text{ mmol}^{-1}$ and over the whole run the mean lactate value was $6.5 \pm 0.9 \text{ mmol}^{-1}$. A significant difference was observed in lactate values between laps [$F(3.45) = 85.41$, $p < 0.05$], with a decrease between the end of the first lap and the end of the third lap ($d = 1.21$) (**Figure 2A**).

Mean pre-exercise pH and HCO_3^- were 7.4 ± 0.0 and $22.7 \pm 1.7 \text{ mmol}^{-1}$, respectively. Over the whole run, the mean pH and HCO_3^- were 7.3 ± 0.0 and $14.7 \pm 1.6 \text{ mmol}^{-1}$, respectively. A significant effect of period was observed for blood pH and HCO_3^- [$F(3.45) = 66.1$, $p < 0.05$; $F(3.45) = 69.32$, $p < 0.05$, respectively], with a large and significant decrease between pre-exercise levels and levels measured at the end of the first lap (pH: $d = 5.79$; HCO_3^- : $d = 5.76$). An increase was also observed between the end of the first lap and the end of the second lap (pH: $d = 1.55$; HCO_3^- : $d = 1.15$). In addition, for HCO_3^- a further increase was observed between the second and third laps ($d = 1.19$) (**Figures 2B,C**).

Correlations between physiological and mechanical analysis of the XCO race.

No significant correlations were found between the time spent in intensity zones expressed as $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ and intensity zones expressed either as $\% \text{HR}_{\text{max}}$ ($r = -0.01$) or $\% \text{MAP}$ ($r = -0.02$). To determine the relative interest of each analysis, the evolution of $\dot{V}\text{O}_2$ and Power were represented as a function of GPS position and intensity zones (**Figures 3A,B**, respectively).

DISCUSSION

The aim of this study was to describe the physiological and mechanical characteristics of the current mountain bike XCO race and to analyze the dynamics of these parameters between laps. The main findings were as follows:

- During a mountain biking XCO race, a significant part of the race is performed above the second ventilatory threshold or even beyond MAP, indicating a high level of solicitation of both aerobic and anaerobic metabolic pathways; furthermore, the respective contributions of these pathways vary between laps.

- Periods spent beyond MAP tend to be short bursts, oscillating mainly between 5 and 10 s, suggesting that mountain biking has a similar acyclical profile to intermittent team sports such as soccer or basketball (Reilly et al., 2000; Cormery et al., 2007).

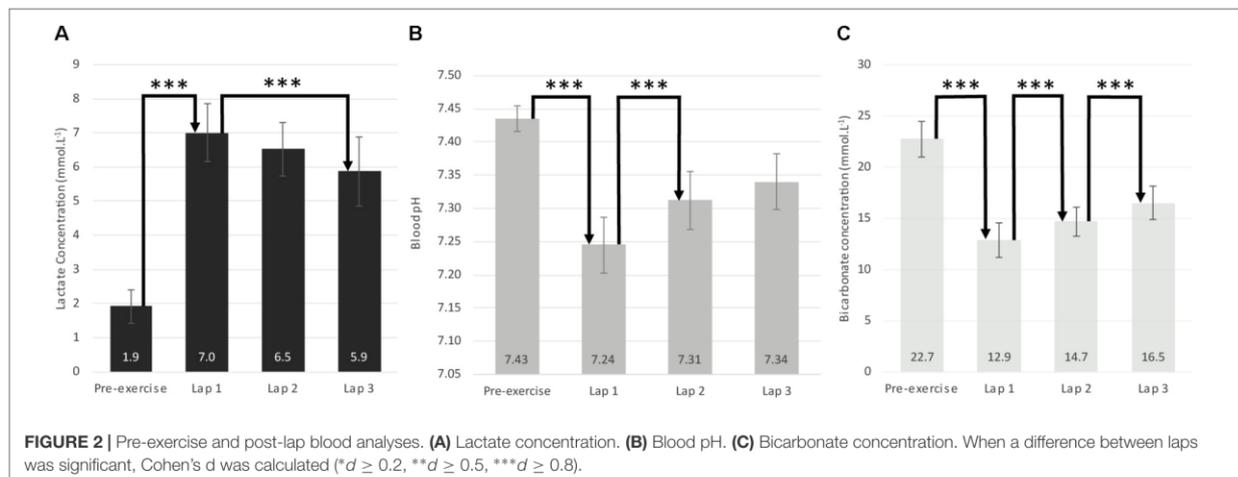
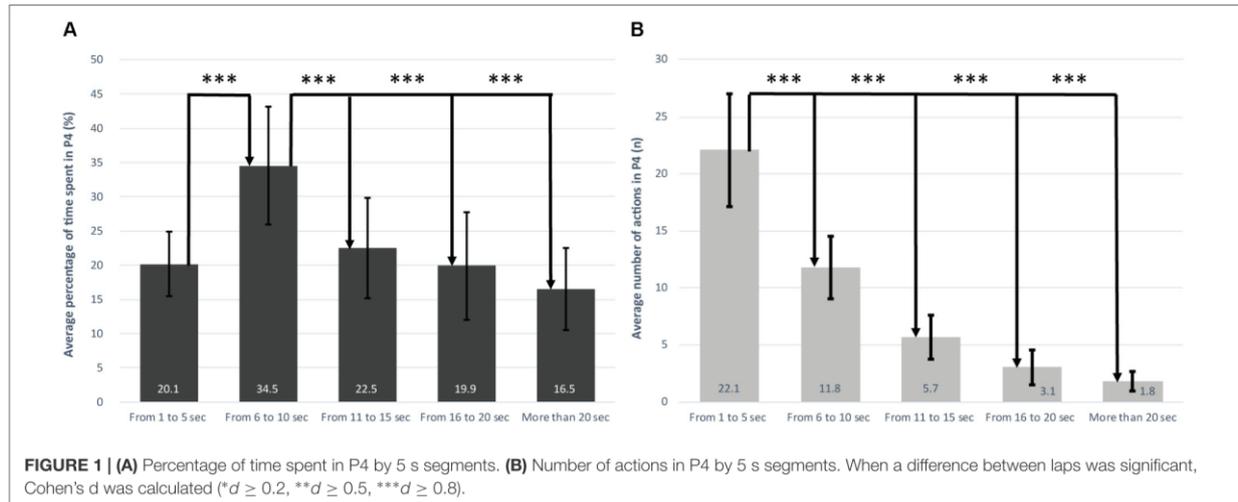
- Classical field parameters such as $\% \text{HR}$ or $\% \text{MAP}$ do not correlate with the physiological demands expressed as $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$, which might thus be the best parameter to monitor the physiological demands of mountain bike XCO.

Classically, the physiological demands of cycling events in field studies are assessed based on HR recordings (Lucía et al., 1999;

TABLE 2 | Percentage of total time spent in each power output zone for each lap.

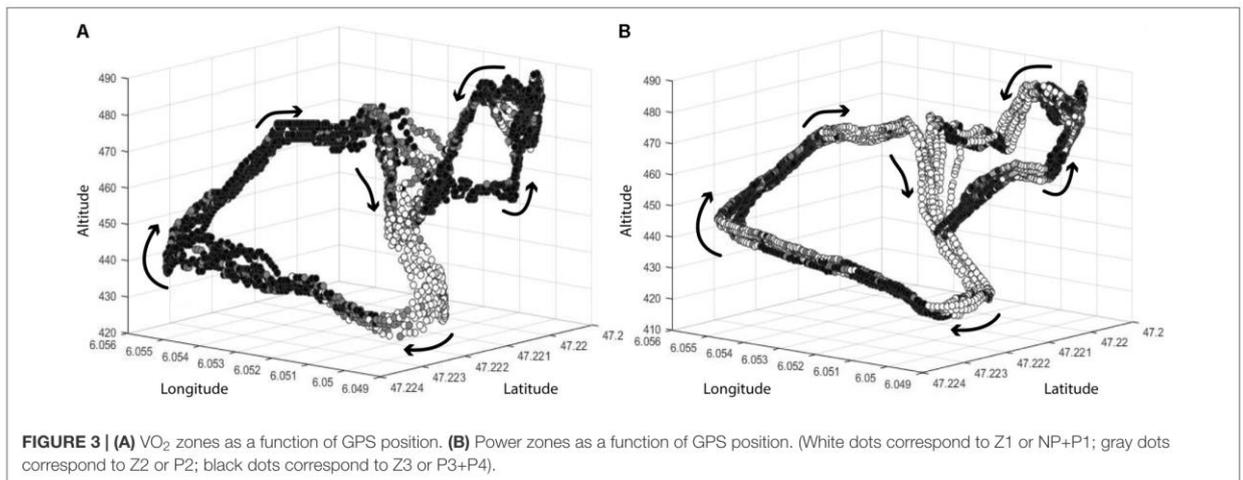
		NP	P1	P2	P3	P4
Power (%TotalTime)	Lap 1	18.8 ± 4.3	27.0 ± 8.1	11.9 ± 4.9	9.5 ± 5.1	32.8 ± 8.2* [†]
	Lap 2	18.9 ± 4.6	31.2 ± 9.8	12.3 ± 5.2	9.7 ± 4.3	27.9 ± 7.9* [†]
	Lap 3	19.8 ± 6.0	33.5 ± 10.2	13.6 ± 5.0	9.1 ± 4.5	24.0 ± 8.2 [†]

Data are presented as mean ± standard deviation, with results of ANOVA comparisons (*: signif. difference between Lap1 and Lap2; [†]significance difference between Lap1 and Lap3; [‡]significance difference between Lap2 and Lap3).



Palmer et al., 1999; Padilla et al., 2000; Impellizzeri et al., 2002) and/or power output (Hansen et al., 1999; Smith et al., 2001; Stapelfeldt et al., 2004; Macdermid and Stannard, 2012), since power output is a direct indicator of mechanical performance (Coyle et al., 1991). The HR values recorded in this study were very similar to those recorded in previous studies analyzing the old XCO format (Stapelfeldt et al., 2004; Impellizzeri and Marcora, 2007). For example, Impellizzeri et al. (2002) reported that 18% of the time was spent in a HR zone under VT1, 52% was spent between VT1 and VT2, and 30% was spent above

VT2, a split which is very close to our findings (Table 1). Thus, based on HR data, our results indicated that the current XCO format is not significantly different from the old one. However, the distribution of power output values recorded in our study were slightly different from those presented in previous studies, one possible explanation could be related to the fact that the XCO race duration was shortened in 2007. For example, Stapelfeldt et al. (2004) reported that 39 ± 6% of race time was spent in P1, 19 ± 6% was spent in P2, 20 ± 3% of race time was spent in P3, and 22 ± 6% was spent in P4. The increased time spent



in P1 observed in the modern format could be related to the need to recover between the explosive actions performed in P4. This observation highlights the altered dynamics of the effort in modern format, characterized by shorter durations and more technical sections.

A novelty of this study was that we measured $\dot{V}O_2$ throughout the race and between laps. This monitoring approach revealed that the time spent in different physiological zones based on $\dot{V}O_2$ values did not correlate with either HR or power output. This difference could be related to the fact that $\dot{V}O_2$ data reflect high-intensity bouts and the recovery periods between these bouts, whereas power reflects power output recorded in the crank arm. In XCO races, technical parts of the race require driving that involves significant upper limb solicitation. This effort is not represented in measurements of power. This result reveals the difficulty in technical sports of relating power output to physiological demands, and thus of describing activity constraints only based on mechanical data provided by cycling parts. In **Figure 3**, which shows a 3D representation of both $\dot{V}O_2$ and power data, in the upper parts of the track, specifically at the end of the climbs and at the beginning of the descending portions, it can be noted that the $\dot{V}O_2$ remains in high-intensity domains. This result contrasts with the power measurements. During these recovery periods, power data provide little or no information. The lack of correlation between HR and $\dot{V}O_2$ has previously been reported in intermittent sports (Bangsbo et al., 2007). In the XCO context, the use of HR values is even more limited due to the presence of static, eccentric and concentric phases (Dean, 1988; Arimoto et al., 2005). Moreover, our participants were allowed to drink only between laps during the 30 s rest, thus they may have become dehydrated during the race, a condition which would affect HR drift and increase the difference between $\dot{V}O_2$ and HR data (Coyle, 1998). Finally, HR could also be affected by the mental load (Blitz et al., 1970), which is particularly prominent during the technical parts of the race and when the risk of falling is high. When expressed in $\% \dot{V}O_{2max}$, our values indicate that both anaerobic and aerobic contributions are solicited during an XCO race, with more than 70% of race

time spent above VT1, and a mean intensity of 87% $\dot{V}O_{2max}$. Moreover, an increase in blood lactate (to 6.5 mmol.l⁻¹) and a decrease in pH values (to 7.29) reflected the extent to which anaerobic metabolism was solicited. Our results also clearly demonstrate the intermittent nature of the XCO race format, with significant use of very short-lived efforts, and a significant proportion of time spent delivering little or very low power (NP). This race dynamic was illustrated in the P4 period by the large number of actions performed during the 1–5 s duration zone ($n = 22.1$ on average) and by the time spent in the 5–10 s period ($34.5 \pm 8.6\%$ P4 total time), suggesting that most of the actions performed in P4 last less than 10 s. These phases often involve static and eccentric contractions of upper body muscles and are associated with an attentional workload that could accelerate the onset of fatigue (Mehta and Agnew, 2012). For example, during technical downhill phases (with a steep slope and frequent roots or rocks), athletes do not pedal, but their muscles are solicited for shock absorption and to maintain balance.

Another novel approach used in the present study was the analysis and comparison of data from each individual lap of the simulated race. Recent studies indicated that during the current XCO format cyclists adopt a fast-starting pacing strategy followed by positive pacing (Granier et al., 2018; Viana et al., 2018). Metabolic data recorded in our study corroborate these observations, since during the first lap a larger proportion of the time was spent at high intensity levels (P4 and Z3) compared to during laps 2 and 3. The first lap was also associated with a significant decrease in blood pH and HCO₃⁻ and a significant increase in blood lactate compared to pre-exercise levels. Blood lactate, pH, and HCO₃⁻ tended to return toward pre-exercise levels following laps 2 and 3, but still remained significantly different to pre-exercise values. These observations reflect high solicitation of the anaerobic pathway in the first lap and a gradual return to a more aerobic exercise regimen during subsequent laps. This result could be explained by the mass-start in the XCO race format, as described by some previous studies (Impellizzeri and Marcora, 2007;

Macdermid and Stannard, 2012), which requires athletes to position themselves ahead of the race to avoid being slowed or hindered by other cyclists when they find themselves on the narrow path or in technical sections of the track. Due to technical constraints, in our study, each run was conducted with only two cyclists on the track at the same time to mimic competitive conditions and the motivational environment of a race, but our results nevertheless agree with pacing analysis reported during a real race (Granier et al., 2018).

The results reported in this study have some practical applications for coaches, athletes or scientists who wish to develop and optimize training programs. For example, a weekly training program should combine high- and low-intensity aerobic sessions, as well as including sessions to improve repeat sprint ability (RSA) and high-intensity intermittent endurance. Bishop et al. (2011), in their narrative review of RSA training, recommend two training approaches: (i) specific training to perform repeated sprints, and resistance training; (ii) working on the limiting factors for RSA (metabolic factors such as oxidative capacity, recovery, and H⁺ buffering; and neural factors like muscle activation and recruitment strategies). For XCO cyclists, a typical training week could include 2–3 high-intensity intermittent training sessions incorporating numerous jumps, climbs and descents to mimic the demands of the race. Due to the high solicitation of the upper limbs during these technical portions of the race, specific work should be included to reinforce these muscle groups. For this type of exercise, mountain riders can focus on resistance training. These practical recommendations are supported by the results reported by Edge et al. (2006) or Hill-Haas et al. (2007), indicating significant improvements in RSA performance after a training program composed of six leg exercise for 2–5 sets at 15–20 RM 3 days per week over 5 weeks. Thus, specific muscle building activity while maintaining a favorable power-weight ratio could be recommended for XCO athletes.

REFERENCES

- Arimoto, M., Kijima, A., and Muramatsu, S. (2005). Cardiorespiratory response to dynamic and static leg press exercise in humans. *J. Physiol. Anthropol. Appl. Hum. Sci.* 24, 277–283. doi: 10.2114/jpa.24.277
- Bangsbo, J., Iaia, F. M., and Krstrup, P. (2007). Metabolic response and fatigue in soccer. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 2, 111–127. doi: 10.1123/ijspp.2.2.111
- Bernard, T., Hausswirth, C., Meur, Y. L., Bignet, F., Dorel, S., and Brisswalter, J. (2009). Distribution of power output during the cycling stage of a triathlon world cup: med. *Sci. Sports Exerc.* 41, 1296–1302. doi: 10.1249/MSS.0b013e318195a233
- Billat, L. V., and Koralsztejn, J. P. (1996). Significance of the Velocity at $\dot{V}O_2$ max and Time to Exhaustion at this Velocity. *Sports Med.* 22, 90–108. doi: 10.2165/00007256-199622020-00004
- Billat, V. L., Slawinski, J., Bocquet, V., Demarle, A., Lafitte, L., Chassaing, P., et al. (2000). Intermittent runs at the velocity associated with maximal oxygen uptake enables subjects to remain at maximal oxygen uptake for a longer time than intense but submaximal runs. *Eur. J. Appl. Physiol.* 81, 188–196. doi: 10.1007/s004210050029
- Bishop, D., Girard, O., and Mendez-Villanueva, A. (2011). Repeated-sprint ability - part II: recommendations for training. *Sports Med.* 41, 741–756. doi: 10.2165/11590560-000000000-00000
- Blitz, P. S., Hoogstraten, J., and Mulder, G. (1970). Mental load, heart rate and heart rate variability. *Psychol. Forsch.* 33, 277–288. doi: 10.1007/BF00424555

CONCLUSION

Our results indicate that the current XCO format represents an acyclical and intermittent sport which differs from classical cycling events and is closer to some high-intensity team sports. The relevance of $\dot{V}O_2$ values, compared to HR and power output values, when monitoring XCO performance is highlighted. Some results from this study may have direct implications for training strategies, such as the identification of typical bursts above MAP and the potential lack of relevance of powermeters to monitor performance. Further studies will be needed to better understand the metabolic mechanisms and muscular fatigue associated with this sport, as well as the extent of muscle damage induced by eccentric exercise, or the impact of mental workload on XCO performance. Finally, the results from this study emphasize the need for relevant training strategies to optimize performance and recovery.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

AH is the lead author, designed the study, performed the experiments, processed the data, and wrote the paper. SD performed the experiments and processed the data. DB and L-aM performed the experiments. JB designed the study, processed the data, and wrote the paper.

ACKNOWLEDGMENTS

We are very grateful to the cyclists in the professional Technoteam 13 structure and the French Team and to the French cycling federation's national coaches, Yvon Vauchez, Yvan Clolus, Philippe Chanteaux, and Cyril Granier, for agreeing to participate in this study.

- Cormery, B., Marcil, M., and Bouvard, M. (2007). Rule change incidence on physiological characteristics of elite basketball players: a 10-year-period investigation. *Br. J. Sports Med.* 42, 25–30. doi: 10.1136/bjism.2006.033316
- Coyle, E. F. (1998). Cardiovascular drift during prolonged exercise and the effects of dehydration. *Int. J. Sports Med.* 19(Suppl. 2), S121–S124. doi: 10.1055/s-2007-971975
- Coyle, E. F., Feltner, M. E., Kautz, S. A., Hamilton, M. T., Mountain, S. J., Baylor, A. M., et al. (1991). Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 23, 93–107. doi: 10.1249/00005768-199101000-00015
- Dean, E. (1988). Physiology and therapeutic implications of negative work. *Phys. Ther.* 68, 233–237. doi: 10.1093/ptj/68.2.233
- Edge, J., Hill-Haas, S., Goodman, C., and Bishop, D. (2006). Effects of resistance training on H⁺ regulation, buffer capacity, and repeated sprints. *Med. Sci. Sports Exerc.* 38, 2004–2011. doi: 10.1249/01.mss.0000233793.31659.a3
- Granier, C., Abbiss, C. R., Aubry, A., Vauchez, Y., Dorel, S., Hausswirth, C., et al. (2018). Power output and pacing during international cross-country mountain bike cycling. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 1–22. doi: 10.1123/ijspp.2017-0516
- Gregory, J., Johns, D. P., and Walls, J. T. (2007). Relative vs. Absolute physiological measures as predictors of mountain bike cross-country race performance. *J. Strength Cond. Res.* 21, 17–22. doi: 10.1519/00124278-200702000-00004
- Gregory, J. R. (2002). *The Physiological and Physical Determinants of Mountain Bike Cross Country Cycling*. Available at: http://eprints.utas.edu.au/19926/1/whole_GregoryJohnRaymond2002_thesis.pdf [accessed May 29, 2017].

- Gullstrand, L., Sjödin, B., and Svedenhag, J. (1994). Blood sampling during continuous running and 30-second intervals on a treadmill. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 4, 239–242. doi: 10.1111/j.1600-0838.1994.tb00434.x
- Hansen, E. A., Jensen, K., and Klausen, K. (1999). The workload demands in cyclo-cross. *Cycle Coach*. 2, 23–24.
- Hill-Haas, S., Bishop, D., Dawson, B., Goodman, C., and Edge, J. (2007). Effects of rest interval during high-repetition resistance training on strength, aerobic fitness, and repeated-sprint ability. *J. Sports Sci.* 25, 619–628. doi: 10.1080/02640410600874849
- Hurst, H. T., and Atkins, S. (2006). Power output of field-based downhill mountain biking. *J. Sports Sci.* 24, 1047–1053. doi: 10.1080/02640410500431997
- Impellizzeri, F., Sassi, A., Rodriguez-Alonso, M., Moggi, P., and Marcora, S. (2002). Exercise intensity during off-road cycling competitions. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34, 1808–1813. doi: 10.1097/00005768-200211000-00018
- Impellizzeri, F. M. (2005). Correlations between physiological variables and performance in high level cross country off road cyclists. *Br. J. Sports Med.* 39, 747–751. doi: 10.1136/bjism.2004.017236
- Impellizzeri, F. M., and Marcora, S. M. (2007). The physiology of mountain biking. *Sports Med.* 37, 59–71. doi: 10.2165/00007256-200737010-00005
- Inoue, A., Sá Filho, A. S., Mello, F. C., and Santos, T. M. (2012). Relationship between anaerobic cycling tests and mountain bike cross-country performance. *J. Strength Cond. Res.* 26, 1589–1593. doi: 10.1519/JSC.0b013e318234eb89
- Lee, H., Martin, D. T., Anson, J. M., Grundy, D., and Hahn, A. G. (2002). Physiological characteristics of successful mountain bikers and professional road cyclists. *J. Sports Sci.* 20, 1001–1008. doi: 10.1080/026404102321011760
- Lucía, A., Hoyos, J., Carvajal, A., and Chicharro, J. L. (1999). Heart rate response to professional road cycling: the tour de France. *Int. J. Sports Med.* 20, 167–172. doi: 10.1055/s-2007-971112
- Macdermid, P. W., and Stannard, S. (2012). Mechanical work and physiological responses to simulated cross country mountain bike racing. *J. Sports Sci.* 30, 1491–1501. doi: 10.1080/02640414.2012.711487
- McLellan, T. M. (1985). Ventilatory and plasma lactate response with different exercise protocols: a comparison of methods. *Int. J. Sports Med.* 6, 30–35. doi: 10.1055/s-2008-1025809
- Mehta, R. K., and Agnew, M. J. (2012). Influence of mental workload on muscle endurance, fatigue, and recovery during intermittent static work. *Eur. J. Appl. Physiol.* 112, 2891–2902. doi: 10.1007/s00421-011-2264-x
- Padilla, S., Mujika, I., Orbananos, J., and Angulo, F. (2000). Exercise intensity during competition time trials in professional road cycling. *Med. Sci. Sports Exerc.* 32, 850–856. doi: 10.1097/00005768-200004000-00019
- Palmer, G. S., Borghouts, L. B., Noakes, T. D., and Hawley, J. A. (1999). Metabolic and performance responses to constant-load vs. variable-intensity exercise in trained cyclists. *J. Appl. Physiol.* 87, 1186–1196. doi: 10.1152/jap.1999.87.3.1186
- Prins, L., Terblanche, E., and Myburgh, K. H. (2007). Field and laboratory correlates of performance in competitive cross-country mountain bikers. *J. Sports Sci.* 25, 927–935. doi: 10.1080/02640410600907938
- Reilly, T., Bangsbo, J., and Franks, A. (2000). Anthropometric and physiological predispositions for elite soccer. *J. Sports Sci.* 18, 669–683. doi: 10.1080/02640410050120050
- Reilly, T., Morris, T., and Whyte, G. (2009). The specificity of training prescription and physiological assessment: a review. *J. Sports Sci.* 27, 575–589. doi: 10.1080/02640410902729741
- Riboli, A., Cè, E., Rampichini, S., Venturelli, M., Alberti, G., Limonta, E., et al. (2017). Comparison between continuous and discontinuous incremental treadmill test to assess velocity at $\dot{V}O_{2max}$. *J. Sports Med. Phys. Fit.* 57, 1119–1125. doi: 10.23736/S0022-4707.16.06393-3
- Sanders, D., Myers, T., and Akubat, I. (2017). Training-intensity distribution in road cyclists: objective versus subjective measures. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 12, 1232–1237. doi: 10.1123/ijsp.2016-0523
- Smith, M. F., Davison, R. C., Balmer, J., and Bird, S. R. (2001). Reliability of mean power recorded during indoor and outdoor self-paced 40 km cycling time-trials. *Int. J. Sports Med.* 22, 270–274. doi: 10.1055/s-2001-13813
- Stapelheldt, B., Schwirtz, A., and Schumacher, Y. O. (2004). Workload demands in mountain bike racing. *Int. J. Sports Med.* 25, 294–300. doi: 10.1055/s-2004-819937
- Sullivan, G. M., and Feinn, R. (2012). Using effect size—Why the *P* value is not enough. *J. Grad. Med. Educ.* 4, 279–282. doi: 10.4300/JGME-D-12-00156.1
- Taylor, H. L., Buskirk, E., and Henschel, A. (1955). Maximal oxygen intake as an objective measure of cardio-respiratory performance. *J. Appl. Physiol.* 8, 73–80. doi: 10.1152/jap.1955.8.1.73
- UCI Regulations (2018). Available at: <http://www.uci.ch/inside-uci/rules-and-regulations/regulations/> [accessed June 26, 2018].
- Viana, B. F., Pires, F. O., Inoue, A., and Santos, T. M. (2018). Pacing strategy during simulated mountain bike racing. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 13, 208–213. doi: 10.1123/ijsp.2016-0692
- Washburn, R. A., and Seals, D. R. (1983). Comparison of continuous and discontinuous protocols for the determination of peak oxygen uptake in arm cranking. *Eur. J. Appl. Physiol.* 51, 3–6. doi: 10.1007/BF00952531

Conflict of Interest Statement: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright © 2018 Hays, Devys, Bertin, Marquet and Brisswalter. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

Résumé :

Ce travail de thèse s'articule autour des caractéristiques de la performance dans la discipline du Vélo Tout-Terrain Cross-Country Olympique (VTT XCO). La performance produite dans une situation d'interaction homme-matériel résulte de l'adéquation optimale entre le pratiquant et son matériel. Elle résulte aussi bien de facteurs mécaniques (géométrie et rigidité du cadre, réglage des suspensions, taille des pneumatiques, transmission), biomécaniques (adoption d'un patron de pédalage adapté au terrain), physiologiques (économie du geste, endurance, fatigue) ou encore motivationnels (confiance en soi). La discipline spécifique du XCO a fortement évolué, au niveau réglementaire et technologique, depuis un peu moins d'une décennie. C'est pourquoi l'objectif de mes recherches a été de caractériser à la fois la performance in-situ et en laboratoire de manière à améliorer notre compréhension de la discipline dans son état actuel, afin de proposer des interventions au niveau de l'entraînement et sur des aspects plus fondamentaux du geste de pédalage en VTT. En s'intéressant notamment à la pratique de haut-niveau, à la dynamique des efforts et à certains aspects biomécaniques du pédalage, les résultats de ces travaux nous ont permis de mettre en évidence que le format actuel de course correspond à une épreuve de haute intensité à la fois acyclique et intermittente, mais aussi que la modification du matériel n'entraîne pas forcément de changement dans le pattern de pédalage des coureurs.

Mots clés : vélo tout-terrain, cross-country Olympique, facteurs de performance, analyse pluridisciplinaire, physiologie, biomécanique, pédalage

Abstract :

This thesis focuses on performance characteristics in the Cross-Country Olympic Mountain Bike (MTB XCO) discipline. The performance produced in a man-material interaction situation results from the optimal adequacy between the rider and his equipment. It results as much from mechanical factors (frame geometry and rigidity, suspension adjustment, tyre size, transmission) as biomechanical (adoption of a pedalling pattern adapted to the terrain), physiological (economy of movement, endurance, fatigue) or motivational (self-confidence). The XCO's specific discipline has evolved considerably, both in terms of regulations and technology, in just under a decade. Therefore, the objective of my research has been to characterize both in-situ and laboratory performance in order to improve our understanding of the discipline in its current state, in order to propose interventions at the level of training and on more fundamental aspects of pedalling in mountain bikes. By focusing in particular on high-level practice, the dynamics of effort and certain biomechanical aspects of pedalling, the results of this work have enabled us to highlight that the current racing format corresponds to a high intensity event that is both acyclic and intermittent, but also that changing the equipment does not necessarily lead to a change in the pedalling pattern of riders.

Keywords: mountain biking, cross-country Olympic, performance factors, multidisciplinary analysis, physiology, biomechanics, pedalling