Contribution à l'analyse des contraintes métaboliques chez le skieur alpin

Valentin Bottollier

▶ **To cite this version:**

Valentin Bottollier. Contribution à l'analyse des contraintes métaboliques chez le skieur alpin. Education. École normale supérieure de Rennes, 2019. Français. NNT : 2019ENSR0017 . tel-02376534v1

HAL Id: tel-02376534

https://theses.hal.science/tel-02376534v1

Submitted on 22 Nov 2019 (v1), last revised 29 Nov 2019 (v2)

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

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

THESE de DOCTORAT
DE L'UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

École Doctorale : Biologie - Santé

Spécialité de Doctorat: STAPS

Soutenue publiquement le 30/09/2019, par :

Valentin Bottollier

Contribution à l'analyse des contraintes métaboliques chez le skieur alpin compétiteur

Devant le jury composé de:

Robin CANDAU (Rapporteur)
Professeur des Universités, Université de Montpellier

Nicola MAFFIULETTI (Rapporteur)
Professeur des Universités, Schulthess Klinic Zurich

Christine HANON (Examinatrice)
Chercheuse HDR, Fédération Française d'athlétisme

Vincent MARTIN (Examinateur)
Maître de Conférences HDR, Université Clermont-Auvergne

Jacques PRIOUX (Directeur de thèse)
Professeur des Universités, Ecole Normale Supérieure de Rennes

Nicolas COULMY (Co-directeur de thèse)
Chercheur, Fédération Française de Ski

REMERCIEMENTS

En premier lieu je souhaite remercier Jacques Prioux pour la confiance que vous m'avez accordée à l'origine de ce travail de thèse. Merci d'avoir pris le temps de partager avec moi votre expérience universitaire, en particulier du point de vue de la valorisation des travaux scientifiques.

Bien entendu, sans toi Nicolas ces travaux n'auraient pas vu le jour et j'aurais été privé du plaisir quotidien qu'a constitué cette thèse : la réflexion, le ski alpin... Je me suis nourri de ta vision complexe et inductive qui me semble aussi rare que précieuse. Merci pour l'autonomie que tu m'as accordée, c'était pour moi un confort et un gage de productivité. Ah l'autodétermination...

Je tiens à remercier le Pr. Candau pour le temps et l'énergie alloués au travail de rapporteur. J'espère que vous prendrez plaisir à découvrir mon travail.

Je tiens à présenter mes remerciements au Pr. Maffiuletti pour l'investissement que représente le travail de rapporteur. J'espère que mon travail saura toucher votre sensibilité professionnelle.

Dr. Hanon, merci d'avoir accepté ce rôle d'examinatrice pour mon jury de thèse. J'espère que la proximité de mon travail aux problématiques de terrain vous plaira.

Dr. Martin, je vous remercie d'accepter de faire parti de mon jury de thèse. J'espère que vous apprécierez mon travail.

Je tiens à remercier la Fédération Française de Ski pour son accueil m'ayant permis d'appréhender sur le long terme la vie professionnelle : les secrétaires, les athlètes (les solides ayant fait fumer le Lactate Pro 2 ! la barre des 24 mmol.L^{-1} ... Paraît-il que les victoires ne se créent pas dans la facilité...), les entraîneurs, les préparateurs physiques, les kinés, la direction. Les plus humbles m'auront vraiment impressionné et inspiré par leur ouverture d'esprit et leur capacité de remise en question permanente.

« On mesure l'intelligence d'un individu à la quantité d'incertitudes qu'il est capable de supporter ».

Emmanuel Kant

Une pensée particulière va aux collègues du Département Sportif et Scientifique qui m'ont accompagné et auront nourri mes réflexions. Merci Loïc pour ton expérience couplée à ta capacité à remettre en question cette expérience. Tu m'a accueilli sans hiérarchisation, j'ai pris beaucoup de plaisir à bosser avec toi. Plus encore, merci pour ta bonne humeur communicative et à toute épreuve (compile photo à l'appui) !! Matt, tu es un exemple de courage, de sympathie et de compétence. Je te souhaite sincèrement le meilleur pour la suite. Merci également aux étudiants stagiaires avec qui j'ai adoré avoir une première modeste expérience managériale. Un grand merci à l'ensemble des skieurs ayant participé aux pré-manipulations (Merci Marie, testeuse en chef ! toujours avec le sourire) et manipulations. Je pense particulièrement aux jeunes du lycée de Moutiers (certains auront fait jusqu'à 17 jours de manips !), à Michel, aux entraîneurs et stadiers des Menuires pour leur accueil parfait sans lequel les expérimentations n'auraient pas été de cette qualité.

Merci aux stagiaires des différentes formations auxquelles j'ai pris part, du plus dynamique au plus endormi. En fait surtout le plus endormi, toi au fond casquette plate vissée sur la tête tu étais un réel feedback quant à la pertinence de mes propos. Quel plaisir lorsque tu levais le nez « Yes, il semblerait que ce que je raconte l'intéresse un peu ! Ouf, je m'éloigne de ces nombreux enseignants détestables à la platitude du propos ».

Heureusement, j'ai eu le plaisir de côtoyer, plus ou moins longuement, des enseignants/formateurs formidables et je tiens à nommer les principaux. Manu Marchand-Arvier, la pédagogie de l'humour léger. Jean François Robin, Norbert Krantz, Franck Bellard, Thierry Blancon, Albin Sirven, les Insepiens passionnés, passionnants et profondément humains. El Kikiiiii, l'artiste, le virtuose... Popeye, le coach humain, bon type par excellence. Jean-Louis, le splendide coach à l'ancienne, tu m'auras tant appris en si peu de temps...

« En formation, tu veux qu'on te donne du poisson ou tu veux apprendre à pêcher ?! »

Albin Sirven

Plus intimement, je remercie ma Mère qui m'a fortement incité (forcé ? ☺) à aller au ski club de Flumet – alors que je croyais ne pas aimer le ski du fait d'une mauvaise expérience avec l'école primaire – ça a façonné (positivement, je crois) tout le reste de ma vie : mon corps, mon esprit, mon énergie, mes amis, ma trajectoire professionnelle... Dans mon grand besoin d'autonomie, j'ai longtemps pensé que je me forgeais seul mais j'ouvre petit à petit les yeux ☺.

Mon Père qui m'a anodinement déclaré « tu choisis de faire STAPS et tu es tout fier de n'avoir aucun rattrapage et d'obtenir 11 de moyenne en L1 ». L'été suivant, on ne ferait pas de réflexion quant à la mollesse de mon projet de formation ! Mon premier vrai projet autodéterminé : réussir le concours de l'Ecole Normale Supérieure. La suite c'est mon Mentor qui m'a tendu la main avant de devenir mon ami, Wiwi. J'ai bien conscience de tout ce que je te dois !

Et bien sûr, il y a les potes, ces génies, ma base. Je ne m'étends pas, ils se reconnaîtront.

J'ai également une pensée pour Lucie qui m'a aidé, soutenu, inspiré durant ces années.

J'espère vous rendre un peu de la gratitude que j'ai pour vous à travers ces lignes, mais surtout dans la vie.

« Deux petites souris tombent dans un seau plein de crème. La première souris abandonne très vite la lutte et se noie. La deuxième souris ne renonce pas. Elle se débat tant et tant qu'elle finit par transformer la crème en beurre, et elle sort du seau. »

Papa de Franck Abagnele Jr, Arrête-moi si tu peux.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX 12
LISTE DES FIGURES 13
LISTE DES ABBREVIATIONS 15
PUBLICATIONS ET PRESENTATIONS 17
INTRODUCTION GENERALE 19
REVUE DE LITTERATURE 22
1 – Le ski alpin de compétition 22
1.1 - Logique interne de l'activité 22
1.2 - Parcours d'accès au haut niveau 22
1.3 - Organisation annuelle du skieur alpin de haut niveau 24
1.4 - Disciplines 25
1.4.1- Le slalom 25
1.4.2- Le slalom géant 26
1.4.3- Le super géant 27
1.4.4- La descente 27
1.4.5- Le combiné alpin, discipline en voie d'extinction 27
1.4.6- Le slalom parallèle, discipline émergente 28
1.5 - Classement 29
1.6 - Caractéristiques des compétitions et entraînements de ski alpin 30
1.6.1 - Durées d'effort 31
1.6.2 - Caractéristiques du tracé 31
1.6.3 - Caractéristiques de la piste 33
1.6.4 - Caractéristiques du manteau neigeux 33
1.6.5 - Caractéristiques environnementales 35
2 – Performer en ski alpin 36
2.1 - Objectifs d'entraînement 36
2.1.1 - S'entraîner pour l'échéance compétitive 36
2.1.2 - S'entraîner à s'entraîner 36
2.1.3 - S'entraîner pour limiter les risques de blessures 36
2.2 - La technique : produit d'une approche complexe des facteurs de performance. ..40
2.2.1 - Les fondamentaux techniques 40
2.2.2 - Approche complexe 42
2.2.3 - Motricités potentiellement spécifiques du ski alpin 43
2.3 - Facteurs psychosociologiques 54

2.3.1 - Aspects motivationnels 54
2.3.2 - Gestion des émotions 55
2.3.3 - Gestion de l'équilibre de vie 55
2.3.4 - Contexte socio-culturel et géographique 56
2.4 - Facteurs perceptivo-décisionnels 56
2.4.1 - Approches écologique et cognitiviste 56
2.4.2 - Canaux perceptifs principaux en ski alpin 57
2.4.3 - Adaptation de la prise de risque en fonction des enjeux 59
2.5 - Facteurs biomécaniques et neuromusculaires 59
2.5.1 - Influence mutuelle des contraintes biomécaniques et neuromusculaires 59
2.5.2 - Contraintes biomécaniques du ski alpin 60
2.5.2.1 - Bilan des forces appliquées sur le skieur 60
2.5.2.2- Forces de réaction du sol 60
2.5.2.3 - Contraintes vibratoires 66
2.5.2.4 - Angles et vitesses articulaires 68
2.5.2.5 - Fréquence de changement de direction 70
2.6 - Facteurs énergétiques 70
2.6.1 - Filière anaérobie alactique 70
2.6.1.1 - Mesures in situ 70
2.6.2 - Filière anaérobie lactique 71
2.6.2.1 - Mesures in situ 71
2.6.3 - Filière aérobie 73
2.6.3.1 - Tests physiques 73
2.6.3.1.1 - $\dot{V}O_{2max}$ 73
2.6.3.1.2 - Puissance maximale aérobie 78
2.6.3.1.3 - Vitesse maximale aérobie 79
2.6.3.2 - Mesures in situ 79
2.6.3.2.1 - Consommation d'oxygène 80
2.6.3.2.2 - Fréquence cardiaque 81
2.6.4 - Facteurs influençant l'implication des filières énergétiques 82
2.6.4.1 - Environnement hypoxique 82
2.6.4.2 - Contraintes ischémiques 86
2.6.4.3 - Échauffement cardio-respiratoire. 88
2.6.4.4 - Niveau d'hydratation 91
2.6.4.5 - Stocks glucidiques 91

2.6.5 - Part d'implication des filières énergétiques 92
2.6.5.1 - Travaux de laboratoire en ski alpin 93
2.6.5.2 - Bénéfices des qualités de puissance aérobie au-delà d'une manche isolée de ski alpin 94
2.6.5.3 - Méthodes de calcul in situ 95
2.6.5.3.1 - Débit énergétique 95
2.6.5.3.2 - Métabolisme aérobie 97
2.6.5.3.3 - Métabolisme anaérobie lactique 97
2.6.5.3.4 - Métabolisme anaérobie alactique 99
2.6.5.4 - Travaux in situ dans d'autres disciplines que le ski alpin 100
2.6.5.5 - Travaux in situ en ski alpin 106
2.7 - Gestion de l'intensité de ski 108
2.7.1 - Modélisation de la gestion de l'intensité d'effort court 108
2.7.2 - Facteurs influençant la gestion de l'intensité d'effort 109
2.7.2.1 - Facteurs physiologiques 109
2.7.2.1.1 - Paramètres métaboliques 109
2.7.2.1.2 - Paramètres musculaires 110
2.7.2.2 - Facteurs perceptifs 110
2.7.2.2.1 - Perception de la durée de l'effort restant à accomplir 110
2.7.2.2.2 - Perception de l'environnement 111
2.7.2.3 - Facteurs neurophysiologiques 112
2.7.2.3.1 - Influence de l'expérience 112
2.7.2.4 - Facteurs psychologiques 113
2.7.2.4.1 - Risque de chute et de blessure 113
2.7.2.4.2 - Motivation 113
2.7.2.4.3 - Fatigue mentale 114
2.7.2.5 - La RPE paramètre intégratif des facteurs d'influence de la gestion de l'intensité d'effort 114
BUTS ET HYPOTHESES DE TRAVAIL 116
METHODOLOGIE ETUDES 1-4 118
1 – Méthode 118
1.1 - Sujets (études 1 et 2) 118
1.2 - Procédure (études 1 et 2) 118
1.3 - Mesures en laboratoire 120
1.3.1 - Test d'effort maximal (études 1, 2 et 3) 120
1.3.2 - Mesures *in situ* 121

1.3.2.1 - Mesures des échanges gazeux et de la fréquence cardiaque (études 1, 2 et 3) 121
1.3.2.2 - Recueil et détermination de [La] et RPE (études 1, 2, 3 et 4) 121
1.3.2.3 - Enregistrement vidéo (études 1 et 2) 121
2 - Recueil des variables physiologiques, temporelles et perceptives 121
2.1 - Mesure des échanges gazeux et respiratoire (études 1, 2 et 3) 121
2.2 - Mesure de la fréquence cardiaque (études 1, 2 et 3) 122
2.3 - Mesure de la lactatémie sanguine (études 1, 2, 3 et 4) 122
2.4 - Mesure chronométrique (études 1, 2, 3 et 4) 122
2.5 - Mesure de la difficulté perçue de l'effort (études 1, 2, 3 et 4) 122
3 - Traitement des données 122
3.1 - Détermination de $\dot{V}O_{2max}$ (études 1, 2 et 3) 122
3.2 - Estimation de la contribution des systèmes énergétiques (études 1 et 2) 123
4 - Analyse statistique (études 1 et 2) 123
PRESENTATION DES TRAVAUX EXPERIMENTAUX 125
1 – Etude n°1 : Demandes énergétiques au cours de différentes durées de GS et SL *in situ* chez le skieur alpin entraîné 125
1.1 - Introduction 125
1.2 - Méthodes 127
1.2.1 - Procédure 127
1.3 - Résultats 128
1.3.1 - Test d'effort maximal 128
1.3.2 - Durées d'effort *in situ* 128
1.3.3 - Concentration sanguine en acide lactique 128
1.3.4 - Contribution des filières énergétiques au débit énergétique 129
1.3.5 - Paramètres cardio-respiratoires 131
1.3.6 - Difficulté d'effort perçue 133
2 - Etude n°2 : Motricités spécifiques des demandes physiologiques du ski alpin *in situ* . 134
2.1 - Introduction 134
2.2 - Méthodes 136
2.2.1 - Procédure 136
2.2.2- Motricités testées durant 53s à intensité maximale 136
2.3 - Résultats 137
2.3.1 - Test d'effort maximal 137
2.3.2 - Contribution des filières énergétiques à la production d'énergie 137
2.3.3 - Débit énergétique 138

2.3.4 - Paramètres cardio-respiratoires 139
2.3.5 - Concentration sanguine en acide lactique 141
2.3.6 - Difficulté d'effort perçue 142
2.3.7 - Fréquence gestuelle 143
3 - Etude n°3 : Reproductibilité d'un test physique spécifique du ski alpin réalisé sur une planche de slide: le 80s-slide-test 144
3.1 - Introduction 144
3.2 - Méthodes 145
3.2.1 - Sujets 145
3.2.2 - Procédure 146
3.2.2.1 - 80s-slide-test 146
3.2.3 - Mesures *in situ* 147
3.2.3.1 - Mesures biomécaniques 147
3.3 - Analyse statistique 148
3.4 - Résultats 149
4 - Etude n°4 : Stratégie de gestion de l'intensité de ski lors d'une manche longue de GS. Etude de cas. 151
4.1 - Introduction 151
4.2 - Méthodes 153
4.2.1 - Sujets 153
4.2.2 - Procédure 153
4.2.3 - Mesures *in situ* 153
4.2.3.1 - Mesures de lactatémie sanguine et perception de la difficulté de l'effort 153
4.3 - Analyse statistique 154
4.4 - Résultats 154
DISCUSSION GENERALE 155
1 - Partie scientifique 155
1.1 - Les contraintes métaboliques en ski alpin 155
1.1.1 - Contribution des systèmes énergétiques 155
1.1.2 - Paramètres cardio-respiratoires et métaboliques 157
1.2 - La gestion de l'intensité de ski 159
1.3 - Spécificité aux demandes énergétiques du ski alpin de différentes motricités 162
1.4 - Validation d'un test mesurant les qualités énergétiques spécifiquement exploitées en ski alpin 164
2 - Partie application pratique 165
2.1 - Affinage des objectifs d'entraînement 165

2.2 - Affinage des contenus d'entraînement 167
2.3 - Affinage du suivi de la charge d'entraînement 170
3 - Conclusion générale 172
PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 173
1 - Étudier l'influence de la variabilité des caractéristiques du ski alpin sur les contraintes énergétiques 173
2 - Poursuivre la compréhension de la gestion de la vitesse de course 173
3 - Investiguer des motricités spécifiques en fonction des différentes disciplines 173
4 - Investiguer le transfert de qualités physiologiques vers la pratique du ski alpin en incluant davantage de contraintes perceptives spécifiques dans le cadre de la préparation physique 174
OUVERTURE 175
REFERENCES 176
PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES 202
Etude 1 202
Etude 2 212
Etude 3 238
RESUME 253
ABSTRACT 253

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 - Caractéristiques des différentes disciplines du ski alpin (homologation FIS pour les adultes)..... 29
Tableau 1.2 - Résumé des tests physiques corrélés à la performance des skieurs alpins 46
Tableau 1.3 - Étude de cas de la force de réaction du sol en SL et GS chez un skieur de haut niveau (17.4 points FIS en SL) (Kröll et al. 2015b) 66
Tableau 1.4 - Angles moyens, minimaux et maximaux au niveau des genoux intérieurs et extérieurs au virage en SL et GS (Kröll et al. 2015b)..... 68
Tableau 1.5 - Méthodes d'estimation de la contribution des systèmes énergétiques à la production d'énergie 96
Tableau 1.6 - Estimation des contributions énergétiques anaérobie (% anaérobie) et aérobie (% aérobie) dans le débit énergétique total en fonction de la durée d'exercices maximaux réalisés en course à pied ou sur ergocycle (Gastin 2001)..... 104
Tableau 2.1 - Moyennes (± ET) des variables mesurées au cours de SLCT, SLLG, GSCT et GSLG 132
Tableau 2.2 - Moyenne (± ET) des variables mesurées au cours de SL, GS, slide, bonds latéraux sur trampoline, bonds latéraux sur box, course à pied et cyclisme 140
Tableau 2.3 - Mesure de la variabilité au cours du 80s-slide-test 149
Tableau 2.4 - Concentration sanguine en acide lactique, performance et difficulté ressentie de l'effort lors des trois tests de ski..... 154

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 - Parcours d'Excellence Sportive (FFS)..... 23
Figure 1.2 - Organisation annuelle prévisionnelle et simplifiée d'un skieur de Coupe du Monde polyvalent..... 24
Figure 1.3 - Slalom (**A**), Slalom géant (**B**), Super géant (**C**), Descente (**D**) et Parallèle (**E**)..... 25
Figure 1.4 - Portes simple (**A**) et banane (**B**)..... 26
Figure 1.5 - Attribution des points à l'issue de Coupe du Monde et Coupe d'Europe (règlement FIS, édition 2017/18)..... 29
Figure 1.6 - Ligne de course dégradée..... 30
Figure 1.7 - Distances entre les portes d'un tracé (Gilgien 2014)..... 32
Figure 1.8 - Distribution des distances entre les portes et des distances horizontales en GS, SG et DH lors de Coupes du Monde masculines (Gilgien 2014)..... 33
Figure 1.9 - Bourrelet de neige de part et d'autre de la ligne de course..... 35
Figure 1.10 - Incidence des ruptures du LCA chez les membres des équipes de France de ski alpin de 1980 à 2013 (Haïda et al. 2016)..... 39
Figure 1.11 - Modèle intégratif de la technique du ski alpin (FFS)..... 41
Figure 1.12 - Caractéristiques biomécaniques du slide comparées à celles du cyclisme et de la course à pied (Baum et al. 1997)..... 48
Figure 1.13 - Motricités potentiellement spécifiques du ski alpin *in situ* : Slide (**A**), Skier's Edge (**B**), BOX test (**C**), Magic Motion (**D** (Panizzola et al. 2010))..... 49
Figure 1.14 - Dispositifs développés par Raschner et al. 1996 (**A**), Pozzo et al. 2009 (**B**), Raschner et al. 2012b (**C**) et Raschner et Mutschlechner (2016) ayant pour objectifs de se rapprocher de la spécificité des contraintes biomécaniques du ski alpin *in situ*..... 50
Figure 1.15 - Forces auxquelles le skieur est soumis lorsqu'il évolue selon une trajectoire rectiligne dans une pente..... 60
Figure 1.16 - Distribution des forces de réaction du sol, relatives au poids de corps lors de manche de GS (noir), SG (gris) et DH (blanc) (Gilgien 2014)..... 61
Figure 1.17 - Force de réaction du sol relative lors de virages de GS et de SL de distances entre les portes et distances horizontales respectives de 25/6m et 10/3m (Spörri et al. 2016a)..... 62
Figure 1.18 - Orientation de la force de réaction du sol par rapport à la ligne de pente (Falda-Buscaiot et al. 2017)..... 63
Figure 1.19 - Force de réaction du sol au niveau des skis intérieur et extérieur en GS au virage chez 3 skieurs lors de 2 virages, intervalle de confiance de 95% (zones grises) (Meyer 2012)..... 65
Figure 1.20 - $\dot{V}O_{2max}$ des skieurs membres des équipes de France en fonction du sexe et de la spécialité entre 1994 et 2010 exprimées en $L.min^{-1}$ (**A**) et $mL.min^{-1}.kg^{-1}$ et $mL.min^{-1}.kgMM^{-1}$ (**B**) (Zitoun-Florentin 2011)..... 75
Figure 1.21 - Modélisation de $\dot{V}O_{2max}$ en fonction de l'âge des hommes (**A**) et des femmes (**B**) membres des équipes de France de ski alpin entre 1994 et 2010 (Zitoun-Florentin 2011).... 76
Figure 1.22 - $\dot{V}O_{2max}$ des skieurs membres des équipes de France entre 1995 et 1997 dans différentes disciplines (Données internes FFS in Zitoun-Florentin 2011)..... 77
Figure 1.23 - Valeurs brutes de PMA (W) des skieurs membres des équipes de France de 1994 à 2010 selon le sexe et la spécialité (Zitoun-Florentin 2011)..... 78

Figure 1.24 - VMA ($km.h^{-1}$) des skieurs membres des équipes de France de 1994 à 2010 selon le sexe et la spécialité (Zitoun-Florentin 2011) 79
Figure 1.25 - Différence alvéolo-capillaire de pression partielle en O_2 au cours de l'exercice en plaine et à 4300m (Lovering et al. 2008) 83
Figure 1.26 - Synthèse des études sur le pourcentage de diminution de $\dot{V}O_{2max}$ en fonction de l'altitude chez des athlètes non acclimatés dont les $\dot{V}O_{2max}$ sont supérieures à $60mL.mn^{-1}.kg^{-1}$ (Wherlin et Hallén, 2006) 85
Figure 1.27 - Position basse d'un skieur élite en SL 87
Figure 1.28 - Schématisation de l'implication des métabolismes anaérobie et aérobie sans (**A**) et avec (**B**) échauffement préalable (Bishop 2003a) 91
Figure 1.29 - Part de contribution des différents systèmes métaboliques (D'après Poortmans 1988 in Poortmans et Boisseau 2017) 101
Figure 1.30 - Résumé de la littérature concernant l'implication de la filière aérobie dans le débit énergétique total d'efforts d'intensités maximales et de différentes durées (Gastin 2001) 102
Figure 1.31 - Contribution des systèmes aérobie et anaérobies par tranches de 10s au cours de 200m, 400m, 800m et 1500m (Spencer et Gastin 2001) 103
Figure 1.32 - Intensité d'effort décroissante lors d'un 400m en course à pied (d'après Hanon et al. 2010) 109
Figure 2.1 - Caractérisation des slaloms géants (**A**) et slaloms (**B**) 120
Figure 2.2 - Temps de course des vainqueurs de Coupe du Monde et Coupe d'Europe au cours des 2 dernières saisons 128
Figure 2.3 - Part de contribution des métabolismes aérobie, glycolytique et des phosphagènes sur le débit énergétique total au cours de SLCT, SLLG, GSCT et GSLG 129
Figure 2.4 - Débit énergétique total, aérobie, glycolytique et des phosphagènes au cours de SLCT, SLLG, GSCT et GSLG 130
Figure 2.6 - $\dot{V}O_2$ moyennées toutes les 5s au cours de SLCT, SLLG, GSCT et GSLG 131
Figure 2.7 - Part de contribution des métabolismes anaérobie lactique et aérobie sur le débit énergétique total au cours de SL, GS, slide, bonds latéraux sur trampoline, bonds latéraux du box test, course à pied et cyclisme 137
Figure 2.8 - Débit énergétique total, aérobie, glycolytique et des phosphagènes au cours de SL, GS, slide, bonds latéraux sur trampoline, bonds latéraux sur box, course à pied et cyclisme 139
Figure 2.9 - $\dot{V}O_2$ moyennées toutes les 5s au cours de SL, GS, slide, bonds latéraux sur trampoline, bonds latéraux sur box, course à pied et cyclisme 140
Figure 2.10 - Concentrations sanguines en acide lactique mesurée post SL, GS, slide, bonds latéraux sur trampoline, bonds latéraux sur box, course à pied et cyclisme 141
Figure 2.11 - Difficulté perçue de l'effort au cours de SL, GS, slide, bonds latéraux sur trampoline, bonds latéraux sur box, course à pied et cyclisme 142
Figure 2.12 - Images de la planche de slide (**A**), des taquets latéraux (**B**) et des sur-chaussures en nylon (**C**) 147
Figure 2.13 - Nombre d'appuis par tranche de 10s 150

LISTE DES ABBREVIATIONS

Bpm Battements par minute

CA Combiné alpin

CE Coupe d'Europe

CT Court

CM Coupe du Monde

CMJ Counter Mouvement Jump

CO_2 Dioxyde de carbone

DH Descente

DSS Département Sportif et Scientifique

$E_{aéro}$ Quantité d'énergie nette provenant du métabolisme aérobie

E_{tot} Quantité d'énergie nette totale

EqO_2 Equivalent énergetique en O_2

EMG Electromyogramme

ET Ecart type

FC Fréquence cardiaque

FC_{moy} Fréquence cardiaque moyenne

FC_{pic} Fréquence cardiaque pic

FFS Fédération Française de Ski

FIS Fédération Internationale de Ski

FR Fréquence respiratoire

GS Slalom géant

HSD Honest significant difference

H^+ Ion Hydrogène

JO Jeux Olympiques

[La] Concentration sanguine en acide lactique

$[La]_{max}$ Concentration sanguine maximale en acide lactique

$[La]_{pic}$ Concentration sanguine pic en acide lactique

LCA Ligament croisé antérieur

LG Long

PAO_2 Pression alvéolaire en oxygène

PaO_2 Pression artérielle en oxygène

PCr Phosphorylcréatine

PIO_2 Pression partielle en oxygène dans l'air inspiré

PMA Puissance maximale aérobie

O_2 Oxygène

$\dot{Q}$ Débit cardiaque

QR Quotient respiratoire

RM Répétition maximale

RPE Difficulté perçue de l'effort

Rpm Rotation par minute

SG Super géant

SJ Squat Jump

SL Slalom

SP Slalom parallèle

Tlim Temps limite

VES Volume d'éjection systolique

$\dot{V}CO_2$ Production de dioxyde de carbone

$\dot{V}O_2$ Consommation d'oxygène

$\dot{V}O_{2moy5s}$ Consommation d'oxygène moyenne sur 5 secondes

$\dot{V}O_{2max}$ Consommation maximale d'oxygène

$\dot{V}O_{2moy}$ Consommation d'oxygène moyenne

$\dot{V}O_{2pic}$ Consommation d'oxygène pic

$\dot{V}O_{2départ}$ Consommation d'oxygène au départ

VMA Vitesse maximale aérobie

Δ Delta

ΔE Débit énergétique total

$\Delta E[La]$ Équivalent énergétique anaérobie lactique

$\Delta E\ O_2$ Équivalent énergétique aérobie

$\Delta EaLa$ Débit énergétique du système des phosphagènes

$\Delta[La]$ Débit énergétique net d'origine anaérobie lactique

PUBLICATIONS ET PRESENTATIONS

Articles publiés dans des revues à comité de lecture

- Bottollier V, Coulmy N, Le Quellec L, Prioux J (2019) Energy demands in well-trained alpine ski racers during different duration of slalom and giant slalom. Journal of Strength and Conditioning Research.

Articles soumis dans des revues à comité de lecture

- Bottollier V, Coulmy N, Cross MR, Le Quellec L, Prioux J. Motor skills specific to field alpine ski racing physiological demands. Journal of Strength and Conditioning Research.
- Bottollier V, Cross MR, Coulmy N, Le Quellec L, Prioux J. Reliability of alpine ski racing specific field test : the 80s-slide-test. Journal of Strength and Conditioning Research.

Publications dans des revues sans comité de lecture

- Bottollier V, Coulmy N. Contraintes métaboliques en ski alpin : revue de questions. DTN Info (vulgarisation des connaissances scientifiques à destination des entraîneurs de ski alpin), 1-20, 2016.
- Bottollier V, Coulmy N. Est-ce important l'aérobie en ski alpin ? Le web-courrier de l'entraîneur et du formateur FFS, 5-6, 2016.
- Bottollier V, Coulmy N. Les étirements, Le web-courrier de l'entraîneur et du formateur FFS, 5-6, 2016
- Bottollier V. Comportements de performance. Orientations Techniques Nationales FFS, www.canal-sport.fr, 2017.

Communication affichée lors de congrès internationaux

- Bottollier V, Coulmy N, Le Quellec L, Prioux J. Contraintes métaboliques au cours de différentes durées de slalom et slalom géant in situ chez le skieur alpin très entrainé. 17ème Congrès international de l'**Association des Chercheurs en Activité Physique et Sportive,** Dijon, 29-31 Octobre 2017.

Communications orales lors de congrès internationaux

- Bottollier V, Coulmy N, Le Quellec L, Prioux J. Energy demands in highly trained alpine ski racers during different duration of *in situ* slalom and giant slalom runs 23 ème Congrès international de l'**European College of Sport Science**, Dublin, 4-7 Juillet 2018.
- Prioux J, Bottollier V, Le Quellec L, Coulmy N. Motor skills specific to field alpine ski racing physiological demands. 24 ème Congrès international de l'**European College of Sport Science,** Prague, 3-5 Juillet 2019.
- Prioux J, Bottollier V, Le Quellec L, Coulmy N. Motor skills specific to field alpine ski racing physiological demands. 18ème Congrès international de l'**Association des Chercheurs en Activité Physique et Sportive,** Paris, 29-31 Octobre 2019.

INTRODUCTION GENERALE

Puisqu'une thèse aspire à partager des connaissances, sources potentielles de réflexions, les lecteurs curieux mais à juste titre potentiellement effrayés par la complexité d'une démarche scientifique entière sont invités à se rendre **page 165** pour prendre connaissance de la partie abordant **les applications pratiques**. J'espère sincèrement que ces quelques lignes sauront toucher votre sensibilité et questionner vos pratiques de passionnés de sport et de ski alpin. Pour les lecteurs plus aventureux, j'espère que vous prendrez plaisir à parcourir ce manuscrit.

La Fédération Internationale de Ski (FIS) et la Fédération Française de Ski (FFS) voient le jour en 1924, année des premiers Jeux Olympiques (JO) d'hiver à Chamonix. En 1937, aux Championnats du Monde de Chamonix, le Megevan Emile Allais l'emporte… avec 13s d'avance sur son dauphin ! Lors des rendez-vous contemporains de ski alpin de premier plan, le vainqueur peut n'avoir qu'une poignée de centièmes d'avance sur les autres concurrents. A titre d'exemple, la finale de Coupe du Monde à Äre en Mars 2018 regroupe les 22 premiers du super géant (SG) raccourci en 0,80s.

Comme dans l'ensemble des disciplines sportives (Marck et al. 2017), le niveau de performance semble s'homogénéiser au fil des décennies. Ce phénomène serait en partie dû à l'augmentation du nombre de compétiteurs, à l'aseptisation relative de l'environnement et à la structuration des méthodes d'entraînement. Les méthodes d'entraînement se seraient développées au gré de l'évolution des connaissances pratiques et scientifiques. Le ski alpin est un sport de constante adaptabilité aux contraintes générées par le couplage de l'environnement, du matériel et du skieur. Ces contraintes sont d'ordres perceptivo-décisionnelles, biomécaniques, musculaires, énergétiques et psycho-affectives.

Un ensemble d'acteurs composant le staff des skieurs s'attache à individualiser leur accompagnement. Il s'agit des entraîneurs, préparateurs physiques, techniciens, préparateurs mentaux, psychologues, médecins, chirurgiens, kinésithérapeutes, ostéopathes, nutritionnistes. Un nouvel acteur s'est plus récemment immiscé dans la préparation des structures sportives de haut niveau, il s'agit des cellules scientifiques. Dès 1989, la FFS a développé ce champ d'action. Cette anticipation s'explique en partie par l'importance et la culture du matériel qui règne dans le monde du ski alpin de haut niveau. Cette culture étant allègrement véhiculée par les médias « spécialisés ». Lorsqu'un skieur est / n'est pas performant, les premiers commentaires sont généralement : « il a fait les bons réglages avec son matériel » ou « il reste des réglages à effectuer avec son matériel ». Ces discours alimentent la polarisation sur le matériel comme

facteur principal de performance en même temps qu'ils marginalisent les autres facteurs de performance. Dans ce contexte, la cellule recherche était initialement davantage centrée sur la veille technologique et l'ingénierie plutôt que sur d'autres sciences d'appui.

Depuis 2004, le département sportif et scientifique (DSS) de la FFS revêt trois missions : la veille technologique, la formation et désormais la recherche. La politique de recherche du DSS, menée par son directeur Nicolas Coulmy, s'inscrit dans une démarche inductive très appliquée, et dans une vision complexe des sciences d'appui au sens d'Edgar Morin (1988, 2005). Le DSS mène ses travaux de recherche avec différents collaborateurs comme l'Ecole Normale Supérieure (ENS) de Rennes et le laboratoire Mouvement Sport Santé (M2S) dans le cadre de ce travail doctoral. Améliorer la connaissance et la compréhension des disciplines (et de leurs évolutions) contribue (i) à affiner les objectifs et contenus d'entraînement et, (ii) à améliorer les contenus de formation des futurs entraîneurs. Cette démarche s'inscrit ainsi dans une volonté de dynamisme des formations initiales et continues.

La littérature scientifique relative au ski alpin est consistante mais seulement parcellaire sur certaines problématiques, notamment physiologiques. Cela peut s'expliquer par les difficultés d'investigation relatives à l'environnement du ski alpin (Koutedakis et al. 1992 ; White et Johnson 1993 ; Neumayr et al. 2003 ; Seifert et al. 2005). Selon Turnbull et al. (2008), quantifier les contraintes rencontrées par les skieurs alpins est un véritable challenge pour la communauté scientifique. En effet, si les évolutions technologiques ont permis des investigations plus écologiques, les mesures à grande échelle en ski alpin restent limitées (McLaughlin et al. 2001 ; Karlsonn 2005).

Par ailleurs, le ski alpin a traversé une vaste révolution matérielle à l'orée du 20^{e} siècle avec l'apparition des skis paraboliques. Ce changement profond, sans remettre en cause la qualité des études antérieures, pose assurément la question de la pertinence contemporaine des connaissances scientifiques antérieures. Pour aller plus loin, la réglementation internationale concernant le matériel évolue régulièrement. Par exemple, le rayon de courbure des skis de slalom géant (GS) a connu deux changements (soit trois configurations différentes : 27m, 35m, 30m) entre 2012 et 2017. Comme les contraintes du ski alpin de haut niveau évoluent vite, les études scientifiques doivent régulièrement mettre à jour les connaissances. Ainsi, les réflexions autour des pratiques d'entraînement restent en adéquation avec la réalité contemporaine du ski alpin.

« La folie, c'est de refaire toujours la même chose et d'attendre des résultats différents. » A. Einstein

De manière générale, Lamb et al. (1998) montrent un fossé entre les connaissances scientifiques et leur utilisation pratique. Le champ sportif n'échappe pas à ce phénomène. En effet, Bishop (2008) évoque ce même fossé entre les entraîneurs et les scientifiques. Pourtant, dans une démarche inductive, les entraîneurs sont à l'origine des problématiques de recherche. Quelle que soit la discipline, l'entraîneur passionné et professionnel est à notre sens friand de nouvelles connaissances pour questionner quotidiennement ses pratiques et éventuellement apporter des adaptations jugées bénéfiques. En ce sens, la démarche des entraîneurs et des scientifiques se rejoignent. Toutefois, le scientifique jouit de temps et de moyens technologiques dont ne disposent que rarement les entraîneurs. En effet, le contact permanent au terrain de ces derniers constitue une contrainte laissant souvent les problématiques d'objectivation de la pertinence des pratiques d'entraînement au second plan. Pour fluidifier les échanges entre science et terrain, il nous semble fondamental (i) que les scientifiques prennent le temps d'échanger régulièrement avec les entraîneurs en venant sur le terrain pour continuer d'alimenter cette démarche inductive prioritaire et, (ii) que les entraîneurs fassent preuve d'une ouverture d'esprit laissant la porte ouverte à une remise en cause de pratiques parfois très ancrées dans la culture commune. De cette manière, les problématiques de recherche seraient davantage pertinentes et la faible utilisation des connaissances scientifiques (Webb et Mackenzie 1993) serait inhibée.

Pour améliorer encore l'accompagnement au service de la performance des athlètes, la routinisation de ces échanges doit être envisagée dans un cadre plus ou moins formel, en fonction des sensibilités des entraîneurs. Il semble y avoir deux raisons de ne pas se laisser de répit dans cette quête d'amélioration de l'environnement d'accompagnement du sportif de haut niveau (i) qu'il soit le meilleur : pour le rester, (ii) qu'il ne le soit pas encore : pour le devenir.

« Freiner c'est tricher ! » J.Lizeroux

La première partie de notre travail a pour but de caractériser les disciplines du ski alpin et leur organisation générale à l'entraînement et en compétition. Une seconde partie s'attache à décrire les facteurs de performance à l'origine des objectifs d'entraînement et des contenus d'entraînement subséquents. Ces facteurs de performance sont d'ordres perceptivo-décisionnels, biomécaniques, neuromusculaires, énergétiques, psychosociologiques et stratégiques au service de la technique.

REVUE DE LITTERATURE

1 – Le ski alpin de compétition

1.1 - Logique interne de l'activité

Le ski alpin consiste à rallier la ligne d'arrivée, depuis le portillon de départ, le plus rapidement possible en respectant les contraintes spatiales représentées par les portes du tracé. Le skieur doit s'adapter en permanence afin de produire la réponse motrice la plus adaptée à ses propres caractéristiques au regard de la piste, de la neige, du tracé, des conditions météorologiques et de son matériel. Une réflexion relative aux objectifs d'entraînement des skieurs alpins doit nécessairement s'appuyer sur la logique interne pertinente de l'activité. Les facteurs de performance découlant de la logique interne du ski alpin sont détaillés dans la seconde partie de la revue de littérature.

1.2 - Parcours d'accès au haut niveau

L'organisation fédérale du ski alpin en France met en œuvre une organisation pyramidale d'accès au très haut niveau. Le skieur débute en se licenciant dans un club affilié à la FFS. Cette affiliation suit le skieur tout au long de sa carrière. Le skieur peut, par la suite, intégrer des regroupements de skieurs les plus prometteurs à différentes échelles. Il s'agit successivement des groupes districts (niveau local), comités (niveau départemental), relèves, Coupe d'Europe et Coupe du Monde (tous trois au niveau national, c'est-à-dire affiliés aux équipes de France). L'intégration de ces groupes se réalise sur la base de sélections quasi exclusivement fondées sur les résultats sportifs.

Le Parcours d'Excellence Sportive (PES) intègre le double projet sport-scolarité (Figure 1.1), conformément aux recommandations du Ministère en charge des Sports. Ainsi, des aménagements scolaires sont mis en place pour favoriser l'entraînement des jeunes skieurs. Il s'agit de la libération au collège d'une ou plusieurs demi-journées par semaine l'hiver pour skier avec l'entraîneur de club ou de district. Au lycée, les pôles inter-régionaux libèrent du temps l'automne pour les stages et l'hiver pour les compétitions tandis que le pôle France consacre de manière exclusive la période de Novembre à Mars au ski, en contrepartie d'un été dédié à la scolarité. Des formations post-bac sont aménagées au cas-par-cas et/ou condensées lors de la période printanière plus creuse.

Figure 1.1 - Parcours d'Excellence Sportive (FFS)

SHN : Sportif de haut niveau ; CNED : Centre national d'enseignement à distance ; AP : Alpes Provence ; AU : Auvergne ; CE : CE Languedoc ; CA : Cote d'Azur ; DA : Dauphiné ; FZ : Forez ; MJ : Massif Jurassien ; LY : Lyonnais et Ain ; MB : Mont Blanc ; PE : Pyrénées-Est ; PO : Pyrénées-Ouest ; MV : Massif Vosges ; SA : Savoie.

Au niveau du parcours d'accès au haut niveau, une revue de question met en évidence l'effet de l'âge relatif sur la performance et sur les sélections en ski alpin (Müller et al. 2016). En effet, les jeunes skieurs nés dans les premiers mois de l'année ont statistiquement plus de chances de performer. Si le niveau de maturation pubertaire est pris en compte, les chiffres sont encore plus éloquents encore : 0,5-2,3% des skieurs alpins et des footballeurs ayant une puberté tardive accède au haut niveau (Müller et al. 2017). En revanche, une étude récente souligne l'inversion significative de cette tendance chez les hommes lorsqu'il s'agit du top niveau

mondial (Bjerke et al. 2017). Les skieurs nés en fin d'année sont plus performants en Coupe du Monde que ceux nés en début d'année.

1.3 - Organisation annuelle du skieur alpin de haut niveau

En ski alpin, la période compétitive de Coupe du Monde s'étale de fin Octobre (épreuves techniques) et fin Novembre (épreuves de vitesse) à mi-Mars (Figure 1.2).

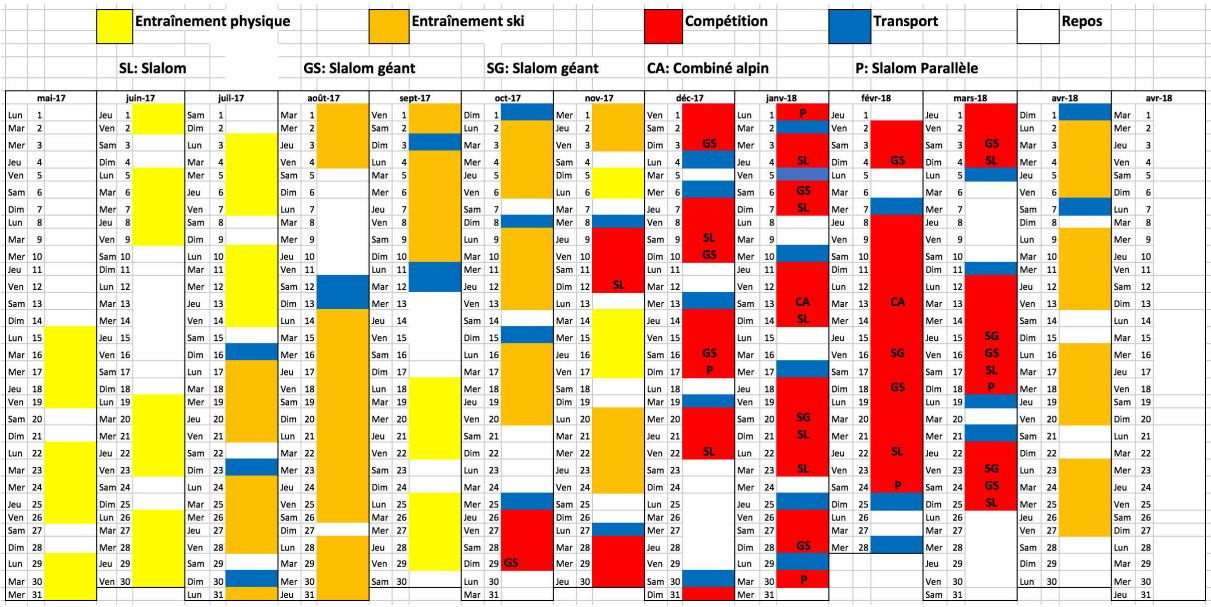


Figure 1.2 - Organisation annuelle prévisionnelle et simplifiée d'un skieur de Coupe du Monde polyvalent
SL : Slalom ; GS : Slalom géant ; SG : Super Géant ; CA : Combiné alpin ; P : Slalom Parallèle.

Les skieurs réalisent entre 7-9 et 20-30 épreuves de premier plan par an, respectivement pour les athlètes monodisciplinaires et polyvalents. Les épreuves majeures récurrentes sont les Coupes du Monde. Les Championnats du Monde et les Jeux Olympiques (JO) ont respectivement lieu tous les deux et quatre ans. Les skieurs (principalement monodisciplinaires) prennent également part à des compétitions de niveau inférieur dans le cadre de leur préparation. Pour optimiser leur niveau de performance lors de la période compétitive, les skieurs s'entraînent en préparation physique (hors-ski) de Mai à Octobre-Novembre. Cette période est consacrée au développement des qualités physiques. Si cette période d'entraînement physique est contrainte par l'état de fraîcheur nécessaire lors des stages de ski estivaux et automnaux, elle permet tout de même de développer les qualités physiques. A contrario, durant la période compétitive, la préparation physique s'assimile davantage à des rappels de qualités physiques, lorsque l'emploi du temps le permet. Entre mi-Juin et le début de la période

compétitive, les skieurs réalisent des stages de ski pour un total d'environ 50-60 jours. Ceux-ci ont lieu sur les glaciers européens (stages de 4-10 jours) ou dans les stations de l'Hémisphère sud (20-30 jours). Enfin, avant de se lancer dans la longue période de préparation de Mai à Octobre-Novembre, les skieurs respectent une période de récupération relative incluant des vacances, des pratiques sportives non imposées et des tests de matériel pour la saison suivante.

1.4 - Disciplines

Figure 1.3 - Slalom (**A**), Slalom géant (**B**), Super géant (**C**), Descente (**D**) et Parallèle (**E**)

1.4.1- Le slalom

Le slalom (SL) (Figure 1.3-A) se déroule sur deux manches d'une durée moyenne de 53s (Gilgien 2014), dont les extrêmes vont de 43s à 58s. Seuls les trente premiers de la première manche courent la seconde manche et ce dans l'ordre inverse des résultats de la première manche (le 30^{e} de la première manche part 1er de la seconde). Les contraintes spatiales sont matérialisées par des piquets simples alternativement rouges et bleus. Les portes simples (horizontales) correspondant à un changement de direction sont espacées de 6 à 13 m. Les

bananes correspondent à deux portes successives sans changement de direction, elles forment un virage de 12-18 m (Figure 1.4). Les figures (portes verticales : doubles, triples, quadruples) sont espacées de 0,75-1 m entre elles avec un espacement entre les deux piquets d'une même porte de 4-6 m. Un SL doit comporter 1-3 bananes, 3 doubles minimum et 1-3 triples ou quadruples. Le rapport du nombre de portes sur la dénivellation du tracé est de 30-35 ± 3%. La dénivellation est de 140-220 m pour les compétitions internationales homologuées par la FIS.

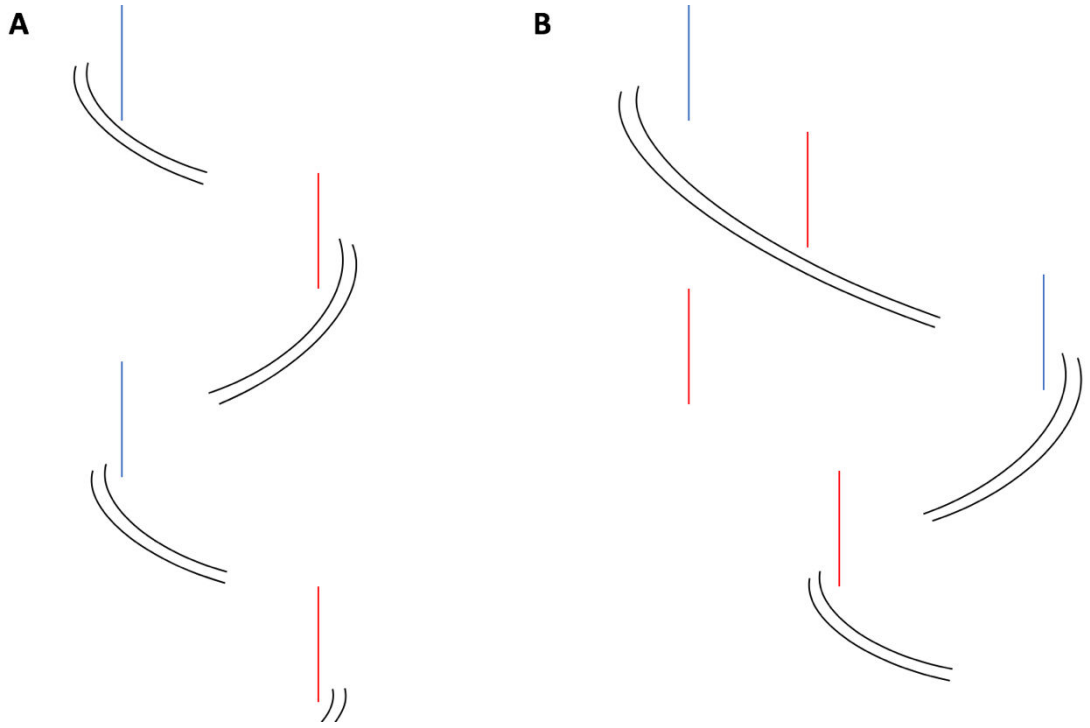


Figure 1.4 - Portes simple (**A**) et banane (**B**)

1.4.2- Le slalom géant

Le slalom géant (GS) (Figure 1.3-B) se déroule sur deux manches d'une durée moyenne de 77,4 ± 5,2s (Gilgien 2014), dont les extrêmes vont de 53s à 82s. Seuls les trente premiers de la première manche courent la seconde manche et ce dans l'ordre inverse des résultats de la première manche. Les contraintes spatiales sont matérialisées par des portes (deux piquets simples reliés par une banderole à mi-hauteur) alternativement rouges et bleues. Les portes simples, correspondant à un changement de direction, sont espacées d'au minimum 10m. Le rapport du nombre de portes sur la dénivellation du tracé est de 11-15%. La dénivellation est de 250-450m et 250-400m pour les compétitions internationales homologuées par la FIS,

respectivement pour les hommes et les femmes. Chez les hommes, en Coupe du Monde, les skieurs évoluent à 17,7 ± 2,3m.s^{-1} sur une distance totale de 1437 ± 65m (Gilgien 2014).

1.4.3- Le super géant

Le super géant (SG) (Figure 1.3-C) se déroule sur une manche d'une durée moyenne de 92,9 ± 9,7s (saisons 2010/11 et 2011/12) (Gilgien 2014). Lors des saisons 2017/18 et 2018/19 des valeurs extrêmes s'étalant de 62s à 93s ont été observées. Les contraintes spatiales sont matérialisées par les mêmes portes qu'en GS. Les portes simples correspondant à un changement de direction sont espacées d'au minimum 25m. Le rapport du nombre de changements de direction sur la dénivellation du tracé est inférieur à 7%. La dénivellation est de 350-650m et 350-600m pour les compétitions internationales homologuées par la FIS, respectivement pour les hommes et les femmes. Lors des Coupes du Monde masculines, les skieurs évoluent à 23,8 ± 2,7m.s^{-1} sur une distance totale de 2293 ± 204m (Gilgien 2014).

1.4.4- La descente

La descente (DH) (Figure 1.3-D) homme se déroule sur une manche d'une durée moyenne de 121,4 ± 17,7s (Gilgien 2014), dont les extrêmes vont de 74s à 148s. Les contraintes spatiales sont matérialisées par des portes rouges. Le rapport du nombre de portes sur la dénivellation du tracé n'est pas contraint par le règlement. La dénivellation est de 450-1100m et 450-800m pour les compétitions internationales homologuées par la FIS, respectivement pour les hommes et les femmes. Pour les épreuves de DH sur deux manches, la dénivellation est de 350-450m. Lors des Coupes du Monde masculines, les skieurs évoluent à 25,6 ± 4,3m.s^{-1} sur une distance totale de 3499 ± 501m (Gilgien 2014). La DH serait en voie de mutation au regard des premières épreuves organisées sur deux manches chez les femmes lors de la saison 2017-18. De plus, les montagnes accueillant les JO de 2022 à Pékin ne présentent pas la dénivellation réglementaire d'une descente en une manche.

1.4.5- Le combiné alpin, discipline en voie d'extinction

Le combiné alpin (CA) (Figure 1.3-A-D) est l'addition d'une manche de SL et d'une manche de DH incluant les caractéristiques de ces disciplines respectives. Il serait en voie d'extinction au vu du nombre décroissant d'épreuves inscrites au calendrier. Cette tendance est confirmée par les récentes déclarations de la FIS.

1.4.6- Le slalom parallèle, discipline émergente

Le slalom parallèle (SP) (Figure 1.3-E) se déroule sur 2-10 manches d'une durée de 19,68 ± 1,82s (dont les extrêmes vont de 17s à 22s) lors de phase finale à partir d'un tableau initial de 16 ou 32 skieurs. Chaque tour se réalise en deux manches, une dans chaque tracé (l'un rouge, l'autre bleu). Les contraintes spatiales sont matérialisées par des portes de GS. Les portes simples correspondant à un changement de direction sont espacées de 10-15m et 20-25m, respectivement pour les formats SL et GS. La dénivellation est de 80-100m pour les compétitions internationales homologuées par la FIS. Le SP est une discipline émergente apparue en 2011. Elle se pratique de manière individuelle et en équipe, respectivement lors des City Event au calendrier de la Coupe du Monde et lors des JO, Championnats du Monde et finale des Coupes du Monde. Le caractère spectaculaire de la confrontation directe et la part de visibilité accrue des têtes d'affiche ne seraient pas étrangers à l'apparition et au développement de cette discipline. En conclusion, le ski alpin regroupe des disciplines techniques (SL, GS, SP), des disciplines de vitesse (SG, DH) et une discipline combinée (CA). Si l'avenir de ces disciplines prend forme, il n'est pas encore scellé. Les évolutions réglementaires de ces disciplines obligent une réactivité (voir une anticipation) de la part de l'encadrement des athlètes.

	SL	**GS**	**SG**	**DH**	**CA**	**SP**
Durée moy (min-max)	53s (43-58s)	77,4 ± 5,2s (53-82s)	92,9 ± 9,7s (62-93s)	121,4 ± 17,7s (74-148s)	Cf SL et DH	19,68 ± 1,82s (17-22s)
Nombre de manches	2	2	1	1 (parfois 2 à l'avenir)	2	2 à 8-10
Dénivelé	140-220m	H : 250-450m F : 250-400m	H : 350-650m F : 350-600m	H : 450-1100m F : 450-800m 2 manches : 350-450m	Cf SL et DH	80-100m
Nombre de portes/ Dénivelé	30-35 ± 3%	11-15%	<7%	/	Cf. SL et DH	20-30 portes
Écart entre les portes	6-13m	>10m	>25m	/	Cf. SL et DH	10-15m en SL 20-25m en GS

Nombre de Coupe du Monde hiver 2017/18	11	9-10	7-9	10	3	5 (2 team event, 2 city event, 1SL ou 1 GS)

Tableau 1.1 - Caractéristiques des différentes disciplines du ski alpin (homologation FIS pour les adultes)

SL : Slalom ; GS : Slalom géant ; SG : Super géant ; DH : Descente ; CA : Combiné alpin ; SP : Slalom parallèle ; moy : moyenne ; min : minimal ; max : maximal ; Cf : Confer ; FIS : Fédération Internationale de Ski ; H : homme ; F: Femme.

1.5 - Classement

1st	place	100	points	16th	place	15	points
2nd	"	80	"	17th	"	14	"
3rd	"	60	"	18th	"	13	"
4th	"	50	"	19th	"	12	"
5th	"	45	"	20th	"	11	"
6th	"	40	"	21st	"	10	"
7th	"	36	"	22nd	"	9	"
8th	"	32	"	23rd	"	8	"
9th	"	29	"	24th	"	7	"
10th	"	26	"	25th	"	6	"
11th	"	24	"	26th	"	5	"
12th	"	22	"	27th	"	4	"
13th	"	20	"	28th	"	3	"
14th	"	18	"	29th	"	2	"
15th	"	16	"	30th	"	1	"

Figure 1.5 - Attribution des points à l'issue de Coupe du Monde et Coupe d'Europe (règlement FIS, édition 2017/18)

L'ensemble des compétitions homologuées par la FFS ou la FIS établit un classement hiérarchisé ainsi qu'un système d'attribution de points FFS ou FIS en fonction du circuit de compétitions. Plus les points sont faibles, meilleure est la performance. Les points du vainqueur de la compétition sont établis en fonction des points des meilleurs skieurs de la course, excepté en Coupe du Monde et Coupe d'Europe pour lesquelles le vainqueur se voit attribuer respectivement 0 et 6 points. Sur cette base, les points des autres compétiteurs sont calculés par le produit de l'écart chronométrique au vainqueur et du point par seconde (établi pour chaque compétition en fonction de ses caractéristiques). En Coupe du Monde et Coupe d'Europe, les trente premiers dossards sont attribués (et tirés au sort par poules de 7 athlètes) en fonction du classement mondial disciplinaire établi à partir du système de points décrit dans la figure 1.5. Après le dossard trente, c'est l'ordre des points FIS qui définit l'attribution des dossards. Le dossard de la première manche revêt une importance particulière au regard de la dégradation du manteau neigeux au fil du passage des skieurs (Figure 1.6). Cette dégradation est plus ou

moins prononcée en fonction de la qualité du manteau neigeux. Plus la piste se dégrade, plus il est compliqué de réaliser une performance pour un niveau de ski donné.

Figure 1.6 - Ligne de course dégradée

1.6 - Caractéristiques des compétitions et entraînements de ski alpin

Pour construire les objectifs d'entraînement et les contenus d'entraînement subséquents, il s'agit de décrire et de comprendre les caractéristiques des compétitions. En somme, il s'agit de définir ce à quoi le skieur doit se préparer. Cette description des compétitions peut s'entendre comme une moyenne des conditions rencontrées et/ou comme les extrêmes rencontrés. En d'autres termes, l'entraînement peut avoir pour objectif de se préparer le plus finement possible aux conditions majoritairement rencontrées en compétitions en tentant de les standardiser à l'entraînement ; ou bien l'entraînement peut chercher à balayer l'éventail des caractéristiques auxquelles les skieurs peuvent être confrontés lors d'échéances compétitives. Faut-il entraîner l'adaptabilité des skieurs et/ou les préparer plus spécifiquement à un environnement dont la standardisation est par définition impossible ? Sans doute est-il pertinent de moduler le

positionnement de ce curseur sur ce continuum standardisation-adaptabilité, avec un timing pertinent au fil de la préparation.

1.6.1 - Durées d'effort

Comme décrit dans la partie précédente, les durées d'effort varient de 20 à 150s en fonction des disciplines. De plus, si une à deux manche(s) sont majoritairement réalisées dans les disciplines historiques, des formats de compétition plus récents imposent jusqu'à dix manches (SP). Les temps de récupération entre deux manches en SL, GS et CA sont relativement confortables, environ 1h30-2h30 (en fonction des dossards) incluant une reconnaissance du tracé de la seconde manche. En revanche, lors des SP, les temps de récupération sont davantage compris entre 5-15 min, contraignant les skieurs à une grande fréquence d'efforts pendant une période de 1h-1h15. Plus la compétition avance vers le dernier carré, plus les temps de récupération sont courts. A l'entraînement, les durées d'effort sont rarement aussi longues et exigeantes qu'en compétition et ce pour des raisons logistiques (taille et sécurisation des pistes), environnementales (environnement hypoxique des glaciers) et stratégiques (peu de manches qualitatives possibles si celles-ci sont aussi longues qu'en compétition). Des séances de SL et de GS ressembleraient respectivement davantage à 4-6 manches de 25-40s et 35-50s, excepté lorsque des manches plus longues de type courses sont tracées, auquel cas le nombre de passages est réduit. Les temps de récupération entre les manches dépendent de la durée de rotation permise par les remontées mécaniques et de la nécessité ou non de terminer la séance d'entraînement tôt afin d'éviter la transformation de la neige due à l'augmentation de la température atmosphérique dans la deuxième moitié de matinée (uniquement lorsque la température devient positive).

1.6.2 - Caractéristiques du tracé

Un traçage est caractérisé par les écarts verticaux et horizontaux entre les portes (Figure 1.7) bien que le traceur ne puisse mesurer, avec une précision et une rapidité d'exécution acceptables, que l'écart entre les portes (en utilisant un télémètre). Plus la pente de la piste augmente, plus l'écart vertical diminue et plus l'écart horizontal augmente afin de limiter la vitesse du skieur (Gilgien 2014). Plus la pente est douce, plus l'écart vertical augmente et plus l'écart horizontal diminue en vue de ne pas freiner le skieur de manière excessive. La réglementation indique que le tracé doit « permettre au coureur de passer les portes d'une façon techniquement correcte » (Réglementation des concours internationaux du ski, 2013). S'il y

avait une technique « correcte » universelle et adaptée à chaque skieur, chaque piste, chaque neige et chaque tracé, cette orientation réglementaire resterait pour le moins subjective. La culture de l'activité veut que le tracé soit régulier par secteur de piste mais le règlement ne l'impose pas. Le placement des portes sur la piste est laissé à la discrétion de l'entraîneur tiré au sort pour tracer la manche. Les distances entre les portes et les distances horizontales sont également ajustées afin que le rapport du nombre de portes sur la dénivellation du tracé corresponde aux standards réglementaires (Tableau 1.1).

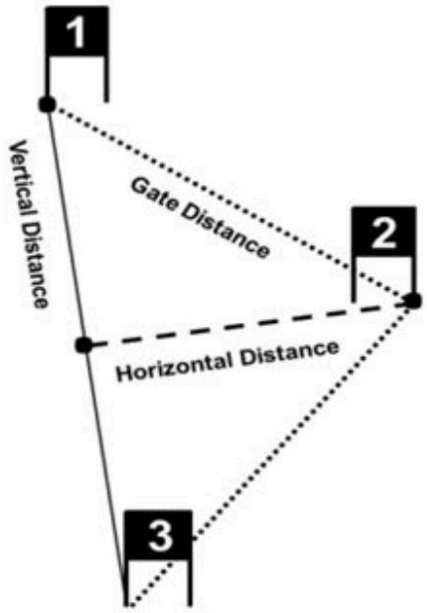


Figure 1.7 - Distances entre les portes d'un tracé (Gilgien 2014)

Ainsi, si le règlement fixe certains critères (nombre de portes par rapport à la dénivellation, écart minimum entre les portes pour certaines disciplines) pour une piste et une discipline donnée, les possibilités de tracés sont particulièrement larges (Figure 1.8). Par conséquent, le skieur doit pouvoir s'adapter efficacement à une multitude de situations.

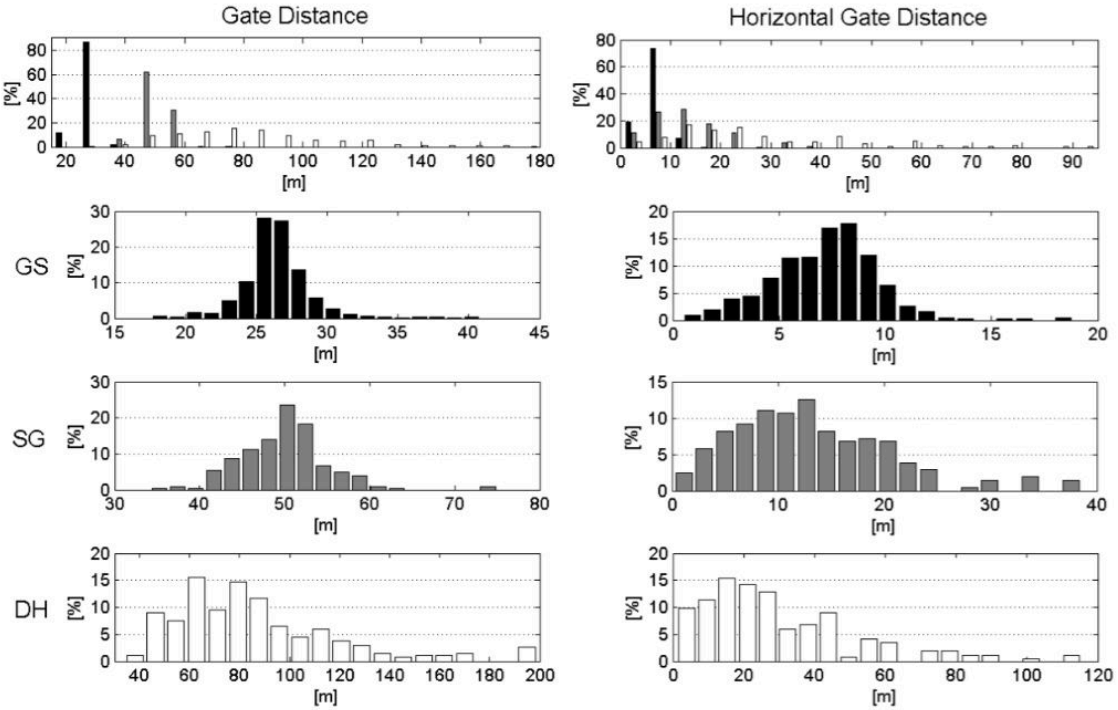


Figure 1.8 - Distribution des distances entre les portes et des distances horizontales en GS, SG et DH lors de Coupes du Monde masculines (Gilgien 2014)

GS : Slalom géant ; SG : Super géant ; DH : Descente.

1.6.3 - Caractéristiques de la piste

Une piste se caractérise par l'évolution de sa largeur, de sa pente, de son orientation (relative aux points cardinaux), de son caractère déversant ou non et de sa longueur. Lors des JO et des Championnats du Monde, en SL, la pente moyenne doit être comprise entre 33 et 45%, elle ne peut pas dépasser 52% (environ) sur de très courtes sections. La piste doit avoir une largeur de 40m bien que des exceptions puissent être accordées dans des cas particuliers et sécuritaires. Le traceur doit percevoir ces caractéristiques afin de proposer un tracé pertinent au regard de la population de skieurs et de ses possibles stratégies propres.

1.6.4 - Caractéristiques du manteau neigeux

La tendance actuelle est que les compétitions de ski alpin « doivent se dérouler sur surfaces de pistes aussi dures que possible » (Réglementation des concours internationaux du ski 2013). Ceci favorise l'équité au niveau de la standardisation du tracé quel que soit le dossard

mais cela n'est pas sans conséquence au niveau des contraintes biomécaniques (Spitzenpfeil 2000 ; Spörri et al. 2016a).

Le manteau neigeux peut être caractérisé selon différentes classifications :

- Neige fraîche naturelle froide
- Neige de culture
- Neige injectée
- Neige de printemps humide
- Neige humide traitée (sel ou ammonitrate)

La qualité de la neige dépend de sa densité, de sa température, de son taux d'humidité, de son âge, de la taille et de la forme de ses grains. Il en résulte différentes qualités de glisse et d'accroche. Lorsqu'une compétition se déroule par temps neigeux ou qu'une chute de neige a accumulé de la neige fraîche sur la piste, l'organisation doit « prendre les dispositions pour la damer ou si possible l'enlever de la piste » (Réglementation des concours internationaux du ski 2013). Ainsi, des lisseurs dérapent entre les portes pour éloigner au maximum cette neige molle et fraîche de la ligne de course en formant un bourrelet de neige (Figure 1.9). Ce bourrelet de neige peut s'avérer très pénalisant en termes de glisse et d'accroche si le skieur sort de la ligne de course. La température environnementale et l'exposition aux rayons solaires influencent également la qualité de la neige. L'exposition aux rayons du soleil dépend de l'orientation et de l'inclinaison de la piste. En effet, il s'avère souvent en fin de saison que la qualité de neige de la première manche (aux alentours de 10h) bénéficie du gel nocturne dû aux températures négatives ; tandis que la qualité de neige peut ramollir significativement lors de la seconde manche (entre 12h et 13h30) et ainsi modifier les paramètres de courses en fonction de l'ordre de passage des concurrents. Lorsque le tracé se creuse au fil des passages, la piste étant de plus en plus compliquée à skier, des remontées spectaculaires au classement peuvent être observées puisque l'ordre de passage est l'inverse du résultat de la première manche. Aussi, l'anticipation de la dégradation du revêtement neigeux pourrait orienter des stratégies de courses.

Figure 1.9 - Bourrelet de neige de part et d'autre de la ligne de course

1.6.5 - Caractéristiques environnementales

Le vent et la luminosité, caractéristiques de la piste, représentent également des contraintes d'influence potentiellement importantes sur le skieur alpin. En effet, plus le vent est rapide et orienté à l'opposé de l'avancement du skieur, plus celui-ci sera freinateur en augmentant les forces de frottements aérodynamiques pour un Cx donné (Brownlie et al. 2010). En réduisant la vitesse du skieur, le vent influence négativement la performance. Si au contraire, l'orientation du vent et celle majoritaire de l'avancement du skieur vont dans une direction similaire, le skieur peut bénéficier des conditions environnementales en vue de performer davantage. Par ailleurs, la luminosité de la piste dépend de l'heure de la journée, de l'orientation de la piste, des obstacles éventuels le long de la piste et prioritairement de la présence ou non

de nuages/brouillard plus ou moins épais. Pour s'adapter aux contraintes de l'épreuve, le skieur a besoin de les percevoir. Le canal visuel étant utilisé de manière prépondérante chez l'homme (Proteau 1992 ; Golomer et al. 1999), celui-ci semble fondamental dans un environnement aussi instable que celui du ski alpin. La qualité de la visibilité, dépendant de la luminosité (contraste entre la neige et les nuages ou le brouillard), pourrait influencer la pertinence spatio-temporelle des choix moteurs du skieur ainsi que son niveau de prise de risque. Ces éléments seront détaillés plus en profondeur dans la partie consacrée aux contraintes perceptivo-décisionnelles. En somme, l'environnement du ski alpin est diamétralement opposé à la régularité et à la stabilité si l'on considère la variabilité de la qualité de neige, de la physionomie des pistes et des tracés, de la visibilité et du vent (Turnbull et al. 2009).

2 – Performer en ski alpin

2.1 - Objectifs d'entraînement

2.1.1 - S'entraîner pour l'échéance compétitive

L'objectif premier du skieur alpin de haut niveau est de performer lors des compétitions de référence auxquelles il projette de participer. Il semble donc prioritaire de caractériser finement les contraintes de ce type d'échéance ainsi que les inter-relations entre ces contraintes. L'idée étant de confronter, en amont, l'athlète à des contraintes similaires, entrelacées de manière complexe et parfois à des niveaux supérieurs de sollicitation. L'organisme du skieur - entendu dans une acception globale et complexe - sera ainsi moins perturbé lors de sa confrontation aux contraintes compétitives si celles-ci ont été pertinemment anticipées.

2.1.2 - S'entraîner à s'entraîner

Pour aller plus loin dans la réflexion quant aux objectifs d'entraînement, il semble important de s'entraîner à s'entraîner, c'est-à-dire développer des qualités non prioritaires pour l'échéance compétitive mais qui permettent de s'entraîner plus quantitativement ou qualitativement. Ces contraintes spécifiques de l'entraînement du skieur alpin sont ultérieurement développées.

2.1.3 - S'entraîner pour limiter les risques de blessures

Le ski est une activité sportive particulièrement traumatisante. Pendant les saisons 2006/07 et 2007/08, 705 blessures ont été recensées chez 2121 skieurs évoluant en Coupe du

Monde (Florenes et al. 2010). Chez les skieurs alpins, 28% de ces blessures sont graves (plus de 28 jours d'arrêt). Entre 1994 et 2011, les chiffres sont semblables (27,5%) pour les skieurs alpins de l'équipe de France (Crestani 2012). 62,1% des blessures surviennent à l'entraînement sur ski, 30,4% en compétition, 6,4% au cours de la préparation physique et 1,1% ne sont pas liés à un accident sportif (Crestani 2012). Ces chiffres correspondent à une prévalence de blessures de 64,66 (dont 24,65 blessures graves) pour 1000 journées-skieurs par saison. 50% des blessures graves sont des entorses et 25% des fractures. Le tiers de ces blessures concerne les entorses graves du genou (Crestani 2012). Ainsi, à l'heure actuelle, cette blessure est la plus fréquente chez les skieurs de haut niveau (Jordan et al. 2017). La population de skieurs de haut niveau se blesse beaucoup plus fréquemment que les skieurs évoluant dans un cadre de loisir non compétitif (Davey et al. 2019). En effet, à la fin des années 1990, la prévalence des blessures en ski alpin loisir en Norvège, en Autriche et aux Etats-Unis varie de 1,8 à 3,4 blessures pour 1000 journées de ski (Bergstrsom et al. 1999 ; Kisser et al.1996 ; Shealy et Ettlinger 1996 ; Davidson et al. 1996). Chez les skieurs des équipes de France, le taux de blessure le plus important touche la DH (29%), puis le SL (25%), viennent ensuite le GS (23%) et le SG (18%) (Crestani 2012). Au niveau international, il y a autant de blessures par unité de temps en GS, SG et DH (Gilgien et al. 2014). Les variations en fonction du sexe ne sont pas significatives en DH et en SL. Les hommes se blessent légèrement moins en SG et les femmes se blessent légèrement moins en GS (Crestani 2012). Durant une saison compétitive, les hommes ont plus de probabilités de se blesser que les femmes et leur temps d'arrêt est plus long (Bere et al. 2013a).

Les tranches d'âges, relatives aux effectifs des collectifs nationaux évoluant en Coupe de Monde, les plus touchées par les blessures se situent entre 19 et 24 ans avec un pic à 21 ans. La valeur de ce pic est également caractéristique des skieurs de 17 ans bien que l'effectif soit plus restreint (14 athlètes de 17 ans vs 58 athlètes de 21 ans). Les athlètes de 28 à 32 ans connaissent eux aussi une augmentation du nombre de blessures, bien que les effectifs dans ces classes d'âges décroissent. Par ailleurs, on distingue clairement un décalage temporel entre le modèle d'évolution des blessures chez les hommes et chez les femmes. En effet, chaque phénomène précédemment décrit dans l'évolution des blessures en fonction de l'âge est antérieur d'environ deux ans chez les femmes. De manière analogue, l'âge moyen d'entrée et de sortie des équipes de France est antérieur pour les femmes, respectivement 16,5 ± 1,9 ans vs 17,7 ± 1,9 ans et 22,0 ± 4,0 vs 23,5 ± 4,3 ans (Crestani 2012).

Crestani (2012) montre la répartition de la localisation corporelle des blessures chez 884 skieurs alpins français membres des équipes de France. La grande majorité de ces blessures

touchent les membres inférieurs (63,5%), viennent ensuite les membres supérieurs (22,1%), le rachis (7,4%), le thorax (0,3%) et enfin l'abdomen (0,3%). La traumatologie de la cheville et de la main correspond respectivement à 15,0% et 9,8% du total des blessures. 31,1% des blessures des skieurs de haut niveau français touche les genoux et lorsque le genou est touché, une rupture du ligament croisé antérieur (LCA) est diagnostiquée 43,6 fois sur 100 (Crestani 2012). La rupture du LCA est la blessure la plus courante chez les skieurs alpins de haut niveau (Jordan et al. 2017). Entre 1980 et 2005, 28,6% des skieurs alpins de l'équipe de France ont connu au moins une rupture du LCA. La prévalence de cette blessure est de 8,5 pour 100 saisons de ski (Dahan et al. 2005). Ces données sont relativement constantes sur la période étudiée. Selon Dahan et al. (2005), en moyenne, 5 lésions du LCA touche chaque année les membres des équipes de France, soit une population d'environ 60 coureurs. Le taux de première rupture du LCA est de 5,7 pour 100 saisons. La probabilité de connaître une seconde fois cette lésion est de 19% pour le même genou et de 30,5% pour l'autre genou (Pujol et al. 2007). Lorsque cette population subit une rupture du LCA, elle a 39% de chance d'en connaître au moins une autre. Une majorité d'auteurs s'accordent sur le fait que les femmes sont davantage touchées par des lésions du LCA que les hommes (Pujol et al. 2007 ; Raschner et al. 2012a ; Haïda et al. 2016). Toutefois, l'étude récente de Tarka et al. (2019) montrerait qu'en ski alpin de compétition la prévalence de ce type de blessure n'est pas supérieure chez les femmes. Les hommes se blessent majoritairement entre Janvier et Avril alors que c'est davantage le cas entre Novembre et Mars pour les femmes (Dahan et al. 2005). On observe plus de ruptures du LCA (primaire, controlatéral et sur-blessure) parmi les skieurs alpins français classés dans le top 30 mondial (Pujol et al. 2007). De manière générale, les skieurs de meilleur niveau (ayant le moins de points FIS) sont davantage sujets à ce type de blessure (Schmitt et al. 2016). Selon l'étude de Haïda et al. (2016), entre 1980 et 2013, la prévalence des lésions du LCA chez les skieurs de l'équipe de France n'a pas cessé d'augmenter (Figure 1.10). Cette étude montre qu'après avoir été blessé les skieurs retrouvent à minima leur niveau de performance. Ce constat semble toutefois à nuancer chez les populations les plus jeunes.

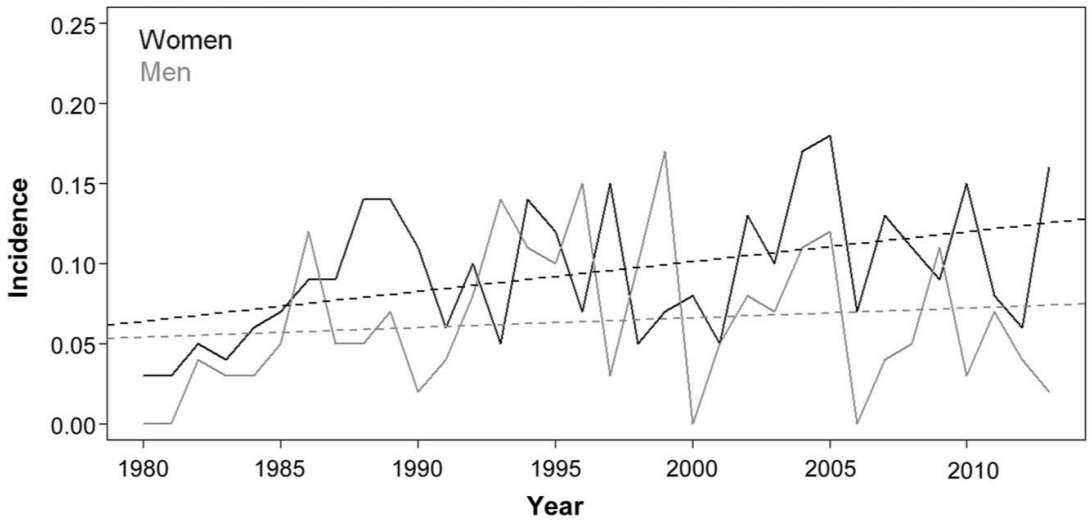


Figure 1.10 - Incidence des ruptures du LCA chez les membres des équipes de France de ski alpin de 1980 à 2013 (Haïda et al. 2016)

L'épidémiologie du ski alpin peut s'expliquer par les contraintes mécaniques, physiologiques, psychologiques et perceptivo-décisionnelles mises en jeu. Les blessures en ski surviennent majoritairement lors de situations de déséquilibre non maîtrisé à la suite d'erreurs techniques ou stratégiques (Bere et al. 2011) couplées à des contraintes mécaniques importantes (Gilgien et al. 2014). Lorsque la structure musculaire joue de manière moins efficace son rôle stabilisateur, les tissus internes tels que les ligaments et les cartilages sont plus vulnérables aux forces inappropriées (Stauber et al. 1989). Les skis paraboliques ont augmenté les forces de « subluxation du valgus » (rotation interne) de l'articulation du genou (Koyangi et al. 2006). Selon Bere et al. (2011), cette gestuelle correspond à un des trois mécanismes à l'origine des ruptures du LCA chez les skieurs évoluant en Coupe du Monde. La plupart des blessures surviennent dans le dernier quart de course (Bere et al. 2013b). Ainsi, les contraintes physiologiques à l'origine de la fatigue dégraderaient la capacité de gestion des déséquilibres (Simoneau et al. 2006) ce qui *in fine* augmenterait le risque de blessure (Stauber et al. 1989 ; Spörri et al. 2012a). Dans les disciplines de vitesse, les blessures sont ainsi souvent liées aux sauts (Gilgien et al. 2014).

Au regard des évolutions des indicateurs épidémiologiques et des contraintes inhérentes au ski alpin, la problématique de recherche de stratégie visant à diminuer le risque de blessure

des skieurs alpins de haut niveau est plus que jamais d'actualité. La recherche d'évitement de cette blessure est d'autant plus centrale que la prise en charge de ces blessures nécessite généralement une intervention chirurgicale et conduit à un arrêt moyen de plus de six mois avant le retour à la compétition. Dans la mesure où ce type de blessure, très fréquente chez les skieurs de haut niveau, peut avoir un impact prégnant sur leur carrière, le développement de méthodologie d'entraînement allant dans le sens de limiter le risque de survenue de ce type de blessure est un enjeu de taille pour optimiser l'entraînement des skieurs alpins de haut niveau. La commission médicale de la FIS rappelle dans son rapport annuel de 2014 sur les blessures - et sur la base des travaux sur l'étiologie des blessures de Bahr et Krosshaug (2005) - que le niveau de préparation physique des skieurs est un facteur de risque de blessure, notamment au niveau des qualités de force musculaire et de contrôle neuromusculaire. De plus, les caractéristiques du matériel seraient un facteur de risque de blessure. La FIS est à l'origine d'une évolution réglementaire quant au rayon de courbure des skis en GS, en passant de 27m à 35m. Cela permet de diminuer le pic de contrainte mécanique (Kröll et al. 2016) ce qui limite les contraintes musculaires sur un virage isolé. Toutefois, l'augmentation du rayon de courbe augmenterait les contraintes physiologiques sur l'ensemble d'un tracé. En effet, (i) le déclenchement du virage est plus contraignant, et (ii) chaque virage est plus long. Ainsi en 2018, la FIS à diminué le rayon de courbure du ski à 30m pour les hommes en GS. Ces multiples changements pourraient également être influencés par le lobby de marques de ski. En effet, chaque changement réglementaire rend obsolète l'ensemble des skis antérieurement vendu.

2.2 - La technique : produit d'une approche complexe des facteurs de performance.

2.2.1 - Les fondamentaux techniques

Pour performer le skieur doit accéder le plus rapidement possible à la ligne d'arrivée. Il s'agit donc de glisser au maximum en ayant une trajectoire au plus proche de la ligne de pente (direction suivie par une balle lâchée dans la pente). Pour autant, le skieur doit respecter des contraintes spatiales matérialisées par les portes du tracé. Il s'agit donc de créer des impulsions latérales à l'origine de trajectoires afin de respecter ces contraintes latérales. Optimiser à la fois la glisse et les impulsions constitue un paradoxe dans la mesure où ces objectifs sont antinomiques. En effet, la création d'impulsions latérales limite majoritairement la glisse du skieur, hormis lorsque l'effet « tire bouchon » observé lors du pas de patineur intervient (Coulmy et al. 2010). La technique du skieur doit donc perpétuellement s'adapter afin d'optimiser l'ajustement du curseur de ce paradoxe (continuum glisse-impulsion). Pour ce faire,

le modèle intégratif construit par le DSS de la FFS propose cinq familles d'outils à la disposition du skieur (Figure 1.11):

- La gestion des déséquilibres
- La gestion de la fréquence gestuelle et de la fluidité
- Les gestuelles d'allégement et de surpression
- Les modes de contractions musculaires
- La gestion des rotations

L'ensemble de ces constituants de la motricité du skieur alpin est entendu comme un tout complexe dont les interrelations sont particulièrement à considérer dans l'analyse du mouvement et les préconisations subséquentes.

Figure 1.11 - Modèle intégratif de la technique du ski alpin (FFS)

Iso : Isométrique ; Plio : Pliométrique.

2.2.2 - Approche complexe

Dans un souci de clarté du propos, les facteurs de performance du skieur alpin sont ici présentés au sein de parties distinctes. Pour autant, c'est bien la compréhension des interrelations entre ces facteurs qui nourrit la réflexion sur la performance en ski alpin. Aussi, les contenus les plus riches sont sans aucun doute ceux mis en relation puisqu'ils s'auto-influencent bien qu'émanant de champs distincts. C'est dans ces interstices que réside la compréhension pertinente d'une motricité puisque le fonctionnement humain est fondamentalement complexe. Si la compartimenter apporte une clarté factice au propos, elle éloigne l'analyse de la réalité.

Cette réflexion s'inscrit en adéquation avec les travaux d'Edgar Morin qui formule pour la première fois la « pensée complexe » en 1982 dans son ouvrage *Science avec conscience*. Selon Morin (1982), « alors que la pensée simplifiante désintègre la complexité du réel, la pensée complexe intègre le plus possible les modes simplifiants de penser, mais refuse les conséquences mutilantes, réductrices, unidimensionnalisantes et finalement aveuglantes d'une simplification qui se prend pour le reflet de ce qu'il y a de réel dans la réalité » (Morin 1982). L'auteur se « réfère au sens latin élémentaire du mot complexus, « ce qui est tissé ensemble ». Les constituants sont différents, mais il faut voir comme dans une tapisserie la figure d'ensemble. Le vrai problème (de réforme de pensée) c'est que nous avons trop bien appris à séparer. Il faut mieux apprendre à relier » (Morin 1982). « Ça veut dire qu'on abandonne un type d'explication linéaire pour un type d'explication en mouvement, circulaire, où l'on va des parties au tout, du tout aux parties, pour essayer de comprendre le phénomène » (Morin 1988). Par exemple, si l'analyse d'un skieur dans un virage se cloisonne aux paramètres aérodynamiques, le skieur devra améliorer son Cx et sa forme afin de performer davantage. Or, l'amélioration du Cx en resserrant les bras va impacter directement et potentiellement gravement la gestion des déséquilibres latéraux qui auront, eux, une incidence bien supérieure sur la performance globale. Ainsi une analyse segmentée peut facilement mener à des préconisations contre-productives. C'est pourquoi une approche la plus complexe possible semble judicieuse. Il s'agirait ainsi de constater et d'accepter que la science produise une connaissance multidimensionnelle mais jamais ni complète ni achevée. C'est pourquoi l'auteur parle de « défi de la complexité » (Morin 1988). Appréhender un phénomène dans une approche complexe favoriserait la compréhension « d'interactions et de rétroactions » afin d'agir en tenant davantage compte du contexte, de la réalité (Morin 2005). Cette perspective est

indéniablement moins confortable qu'une approche parcellaire et demande plus encore de rigueur et de courage. Il faut en effet assumer le deuil de la production d'une connaissance simple et achevée qui serait aussi facile d'accès qu'éloignée de la réalité de la nature.

Cette perspective sous-tend, d'une part, des expérimentations moins décontextualisées dans un environnement plus écologique. L'écueil est le plus difficile contrôle des variables mais le phénomène observé n'est pas appauvri en le sortant de son contexte, il est ainsi plus fidèle à la réalité que l'expérimentateur souhaite investiguer. D'autre part, dans cette perspective complexe, l'analyse des données expérimentales ne doit pas censurer les hypothèses explicatives issues d'interactions et de rétroactions entre divers champs d'analyse. C'est d'ailleurs la pertinence de la notion de champs (parcellarisés) d'investigation qui est remise en cause. Si cette démarche peut donner le sentiment d'une analyse plus confuse et moins tranchée, elle semble être la plus saine intellectuellement.

2.2.3 - Motricités potentiellement spécifiques du ski alpin

La motricité du skieur alpin correspond à la réponse la plus adaptée possible au regard de l'objectif du skieur d'aller vite dans son contexte environnemental. Ce contexte environnemental est d'une part très particulier et d'autre part très variable. Pour progresser, le skieur doit se confronter à ces contraintes environnementales de manière spécifique. Or, pour des raisons climatiques (température, vent, brouillard), logistiques (transport), financières (coût global très élevé d'une journée de ski) et structurelles (ratio temps de descente à ski-temps de montée en empruntant les remontées mécaniques), la quantité de pratique du ski alpin *in situ* est particulièrement restreinte. Pour pallier à ces restrictions de quantité de pratique, les entraîneurs doivent trouver d'autres stimulations pertinentes des skieurs alpins. C'est pourquoi l'entraînement hors neige des skieurs alpins revêt une importance particulière (Tesch 1995 ; Raschner et al. 1997). Pour qu'une motricité soit spécifique au ski alpin, elle doit impliquer des contraintes cinétiques, cinématiques, neuromusculaires et physiologiques caractéristiques du ski alpin (Müller et al. 2000). Un grand nombre de motricités sont utilisées sur le terrain dans le cadre de la préparation physique des skieurs alpins. Elles permettent de développer les qualités énergétiques, neuromusculaires et perceptivo-décisionnelles mais également de constituer des tests physiques. Ces tests physiques permettent (i) d'objectiver les effets physiologiques spécifiques de l'entraînement, (ii) de monitorer de manière longitudinale l'état de forme des athlètes afin d'éviter les épisodes de surmenage non fonctionnel, (iii) de placer des objectifs intermédiaires lors du processus de réathlétisation, et (iv) de fixer des seuils

minimaux d'exigence tout au long du processus de détection. La littérature apporte un éclairage quant à la pertinence des choix de motricités sollicitées à ces fins. A cet effet, les motricités investiguées le sont majoritairement dans le cadre de tests physiques. La complexité des contraintes intrinsèques et environnementales du ski alpin explique la multiplication d'études menant des batteries de tests couvrant des bases larges d'aptitudes physiques. Ainsi, la plupart des études ont seulement comparé les résultats de tests menés en laboratoire avec le niveau des skieurs. Les tests, les variables mesurées et les indicateurs de performance à ski, pris en compte, sont détaillés dans le Tableau 1.2.

Auteurs	**Tests physiques**	**Mesures**	**Indices de performance à ski**
Brown et al. (1983).	Test de force concentrique.	Force et moment de force des extenseurs de genou à 30°.s^{-1}.	Skieurs canadiens niveau national vs régional vs club.
Abe et al. (1992).	Test de force excentrique.	Force des extenseurs de genou.	Equipe nationale Japon vs niveau scolaire.
- White et al. (1991). - Bosco (1996).	Test de Squat jump.	Hauteur de saut.	- Niveau international vs national vs régional. - Groupes nationaux A, B et C italien.
Bosco (1996).	Test de Counter mouvement jump.	Hauteur de saut.	Groupes nationaux A, B et C italien.
Haymes et al. (1980).	Test des Escaliers de Margaria-Kalamen.	Puissance.	Points FIS chez hommes en SL et GS.
- Song (1982). - White et al. (1991). - White et al. (1991).	Test de Wingate de 30s.	- Puissance moyenne brute. - Puissance moyenne brute. - Puissance moyenne relative, indice de fatigabilité.	- Points FIS homme et femme en DH. - Niveau international vs national vs régional. - Niveau international vs national vs régional.

- Haymes et al. (1980). - Platzer et al. (2006).	Test de répétition de contractions concentriques des extenseurs du genou	- Nombre de contractions supérieures à 50% de la puissance initiale. - Puissance relative pic et moyenne.	- Points FIS chez hommes (SL et GS) et femmes (SL) équipe nationale US. - Groupes WC/EC/Juniors femmes Autriche.
- Vandewalle et al. (1987) ; White et al. (1991). - Bosco (1991) ; Bosco et al. (1983), (1994).	Test de répétition de bonds de 60s.	- Puissance relative moyenne. - Puissance relative moyenne.	- Points FIS. - Groupes nationaux et discipline homme et femme.
- Bosco (1996) - Patterson et al. (2019)	Test de répétition de bonds.	- Puissance relative moyenne sur 45s. - Puissance relative lors de 48 Counter mouvement jump sur 2 min avec surcharge de 20% du poids de corps.	- Groupes nationaux et discipline. - Points FIS chez équipe nationale féminine autrichienne.
- Reid et al. (1996). - McGinnis (1981) ; Shea (1983) ; Andersen et al. (1990).	Test hexagonal.	Temps pour réaliser 3 tours sens horaire + 3 antihoraire en sautant par-dessus chaque haie (3 haies amovibles de 20cm et les autres de 25, 32, 35cm) d'un hexagone en conservant la même orientation du corps.	- Niveau national-international vs inférieur chez hommes et niveau international vs inférieur chez femmes. - Points FIS.
- McGinnis (1981) ; Shea (1983). - Brown et al. (1983) ; Andersen et al. (1990) ; Reid et al. (1996).	BOX test de 90s.	Nombre de sauts latéraux de part et d'autre d'une boîte de 40cm de haut et 51cm de large.	- Points FIS - Niveau international vs national vs régional

- Reid et al. (1996). - McGinnis (1981).	Test Sleg.	Nombre de sauts latéraux de part et d'autre de pentes à 27° en 60s.	- Niveau international-national vs inférieur - Skieurs de haut niveau vs compétiteurs vs loisirs
- Neumayr et al. (2003). - Zitoun-Florentin (2011).	Test de puissance aérobie.	- $\dot{V}O_{2max}$, PMA. - $\dot{V}O_{2max}$, PMA.	- Classement mondial au sein du groupe Coupe du Monde vitesse homme autrichien en 1998. - Points FIS au sein des collectifs nationaux français de 1994 à 2010.

Tableau 1.2 - Résumé des tests physiques corrélés à la performance des skieurs alpins

SL : Slalom ; GS : Slalom géant ; DH : Descente ; FIS : Fédération Internationale de Ski ; WC : Coupe du Monde ; EC : Coupe d'Europe ; $\dot{V}O_{2max}$: Consommation maximale d'oxygène ; PMA : Puissance maximale aérobie.

Les indices de performances majoritairement retenus dans ces études sont les points FIS, les niveaux internationaux vs nationaux vs régionaux, les niveaux nationaux vs régionaux vs club, le groupe national Coupe du Monde vs Coupe d'Europe vs junior. L'ensemble de ces travaux montre, d'une part, qu'aucun test physique ne semble se distinguer de manière isolée au regard de sa corrélation avec la performance en ski alpin. A cet égard, White et al. (1993) insistent sur le fait qu'il est difficile de développer un test qui discrimine le niveau des skieurs internationaux entre eux. D'autre part, certains tests physiques (et les qualités physiques qu'ils sollicitent) discriminent statistiquement le niveau des skieurs alpins. Il s'agit principalement des forces concentrique et excentrique à vitesse angulaire faible au niveau des membres inférieurs, de l'endurance de puissance, de la capacité de répétition de sauts (dans toutes les directions) et de la puissance aérobie. Pour autant, une corrélation entre un niveau de performance en ski et un test physique ne permet pas de conclure quant à l'utilisation des qualités impliquées dans le test physique lors de la pratique *in situ* du ski alpin. Par exemple, on pourrait observer une corrélation entre la force maximale volontaire de la flexion du coude et le niveau de performance en ski alpin. Pour autant, sans analyse trop approfondie de la biomécanique du ski alpin, on devine aisément l'implication modeste de cette qualité physique lors de la pratique du ski alpin. De plus, cette corrélation ne permet pas de conclure quant aux liens de causes à effets. En effet, cette qualité physique peut émaner d'un caractère majoritairement inné, issu de l'entraînement non spécifique du ski alpin ou de l'entraînement spécifique du ski alpin (Bacharach et Duvillard 1995). Seule la troisième option, quoi

qu'indiscernable, permettrait d'apporter des arguments robustes quant au caractère spécifique de la motricité mise en jeu par un test physique. De manière générale, une corrélation entre les résultats d'un test et le niveau de performance dans l'activité spécifique permettrait de renforcer la validité du test (Meir 1993). Toutefois, lorsqu'une activité est plurifactorielle comme c'est le cas du ski alpin (Turnbull et al. 2009), le seul critère statistique perd de sa pertinence puisqu'il est très compliqué d'intégrer dans un test physique l'ensemble des contraintes et des variables d'une activité si complexe. En résumé, les tests de laboratoire ne permettraient pas de fournir des informations précises quant à la spécificité des motricités qu'ils mettent en œuvre au regard de la complexité des contraintes du ski alpin.

Si l'on part du principe qu'un stimulus doit être au plus proche de l'activité visée *in fine* afin de favoriser le transfert d'apprentissage, les motricités potentiellement spécifiques du ski alpin doivent être analysées sous le prisme croisé des contraintes biomécaniques, physiologiques et perceptivo-décisionnelles. Ainsi les motricités les plus spécifiques du ski alpin regroupent les caractéristiques les plus proches du ski alpin sur l'ensemble de ces contraintes. Il s'agit dans un premier temps de faire un état des lieux des connaissances scientifiques à ce sujet.

Baum et al. (1997) montrent que les caractéristiques biomécaniques de la motricité du slide (Figure 1.12) sont plus spécifiques du ski alpin que la course à pied et le cyclisme: (i) la direction de la force de réaction du sol est latérale (vs frontale en course à pied et cyclisme), (ii) les contractions musculaires des quadriceps sont excentriques puis concentriques (vs uniquement concentrique en cyclisme), (iii) la charge est supérieure à la masse de l'individu (vs inférieure à la masse en cyclisme) et (iv) le ratio entre les contraintes maximales et les contraintes plus faibles pour une jambe est de 1-1 (vs 1-3 en course à pied) (Figure 1.12). De plus, Baum et al. (1997) montrent que le temps de changement de direction du slide est compris entre 0,8s et 1,2s. Ces données sont similaires au SL et au GS avec respectivement 0,8s et 1,4-1,7s (Berg et Eiken 1999 ; Kröll et al. 2015a). Enfin, Baum et al. (1997) montrent que l'angle minimal au genou durant le slide est de 110-130°, de manière similaire au SL et GS avec 107-122° (Szmedra et al. 2001; Kröll et al. 2015a). Selon Kröll et al. (2003), pour qu'un test physique soit pertinent, il est nécessaire de prouver la conciliation entre le test physique et les contraintes biomécaniques et physiologiques du mouvement écologique du skieur. En effet, la spécificité du développement des qualités neuromusculaires du skieur oblige à tester ces qualités dans un contexte spécifique (Raschner et al. 1996). Par exemple, pour un transfert de qualité musculaire dans l'activité spécifique, il serait pertinent de travailler à des amplitudes musculaires à ± 5-15% de l'activité spécifique (Kusnezow 1977).

Characteristics	Cycling	Running	Sliding
direction of movement	frontal	frontal	lateral
type of contraction	concentric	eccentric / concentric	eccentric / concentric
load	< body mass	> body mass	> body mass
duty cycle	0.5s (at 1 Hz)	0.3 s (at 12 - 15 km/h)	1s (at 1 Hz)
relation between loading and unloading intervals of one leg	1 : 1	1 : 3	1 : 1

Figure 1.12 - Caractéristiques biomécaniques du slide comparées à celles du cyclisme et de la course à pied (Baum et al. 1997)

Par ailleurs, la motricité des bonds latéraux sur trampoline est également très utilisée dans le cadre de la préparation physique des skieurs alpins. Toutefois, à notre connaissance, aucune étude n'a investigué ses contraintes lors d'efforts rectangulaires en vue d'appréhender sa potentielle spécificité physiologique au ski alpin.

Les motricités du Skier's edge et du Magic Motion (Figure 1.13) sollicitent des contraintes cinématiques similaires au ski alpin *in situ* au niveau de l'évolution de l'angle au genou (Panizzola et al. 2010 ; Spörri et al. 2016b). Toutefois, un écueil majeur des motricités accessibles et potentiellement spécifiques du ski alpin est la contrainte mécanique et la réponse musculaire subséquente. En effet, Spitzenpfeil et al. (2005) montrent que les valeurs pics et moyennes de forces de réaction du sol sont significativement supérieures lors de la pratique du ski alpin *in situ* par rapport au Skier's Edge, respectivement 2200N vs 1000N et 380-1000N vs 220-280N. Dès lors, les données électromyographiques (EMG) du Skier's Edge et du Skimagic rapportent des valeurs respectivement inférieures de 56,7% et 39,6% à celles du ski alpin *in situ* (Panizzola et al. 2010). Le niveau d'activation musculaire est significativement plus grand pour chaque muscle sauf pour le tibial antérieur en ski par rapport au Skier's Edge (Spitzenpfeil et al. 2005). De la même manière, le niveau d'activation musculaire est deux à cinq fois plus faible en ski sur herbe, ski à roulettes et roller par rapport au ski alpin *in situ* (Kröll et al. 2005).

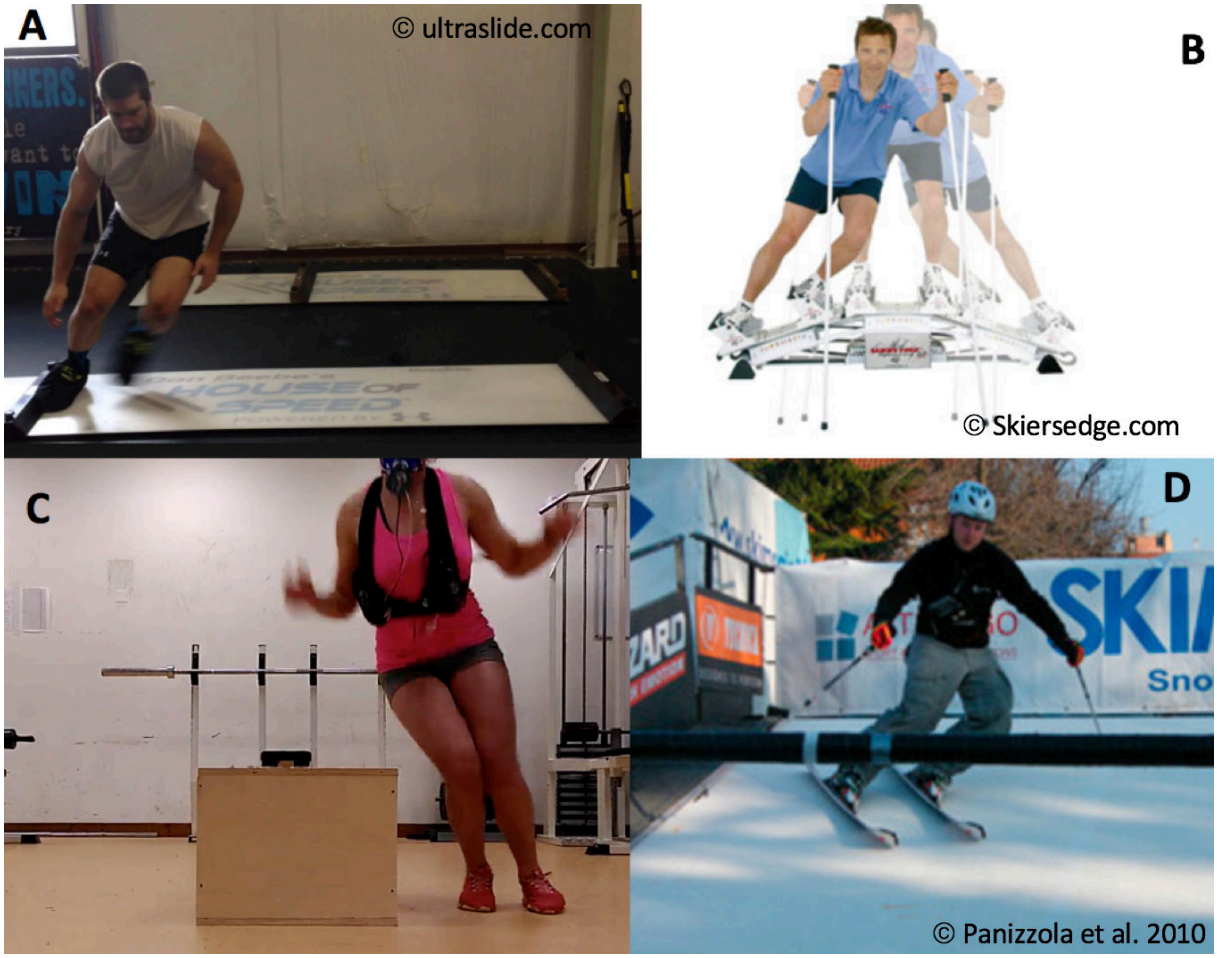


Figure 1.13 - Motricités potentiellement spécifiques du ski alpin *in situ* : Slide (**A**), Skier's Edge (**B**), BOX test (**C**), Magic Motion (**D** (Panizzola et al. 2010))

Par ailleurs, au cours des dernières décennies, des équipes de recherche ont développé des dispositifs dont les paramètres cinétiques et cinématiques étaient les plus spécifiques possible du ski alpin (Figure 1.14). Ces dispositifs ont permis de lever le problème récurrent du manque de contrainte mécanique au niveau de la force de réaction du sol dans toutes les motricités utilisées en préparation physique. Ces dispositifs ont successivement inclu les contraintes mécaniques et musculaires subséquentes des membres inférieurs (Raschner et al. 1996), le stress vibratoire (Pozzo et al. 2009), la latéralisation (Pozzo et al. 2009 ; Raschner et al. 2012b) et les contraintes mécaniques entraînant de rapides contractions excentrique ou concentrique correspondant aux trous et bosses rencontrés sur les pistes de ski alpin (Raschner et Mutschlechner 2016). Ces dispositifs appartiennent au laboratoire autrichien de Salzbourg. Leurs caractéristiques technologiques ne sont pas publiées. Ils peuvent difficilement être utilisés par d'autres équipes de recherche que celle du Pr. Müller. En effet, (i) il n'existe qu'un

exemplaire, et (ii) les skieurs devraient se déplacer au sein du laboratoire de Salzbourg pour l'utiliser.

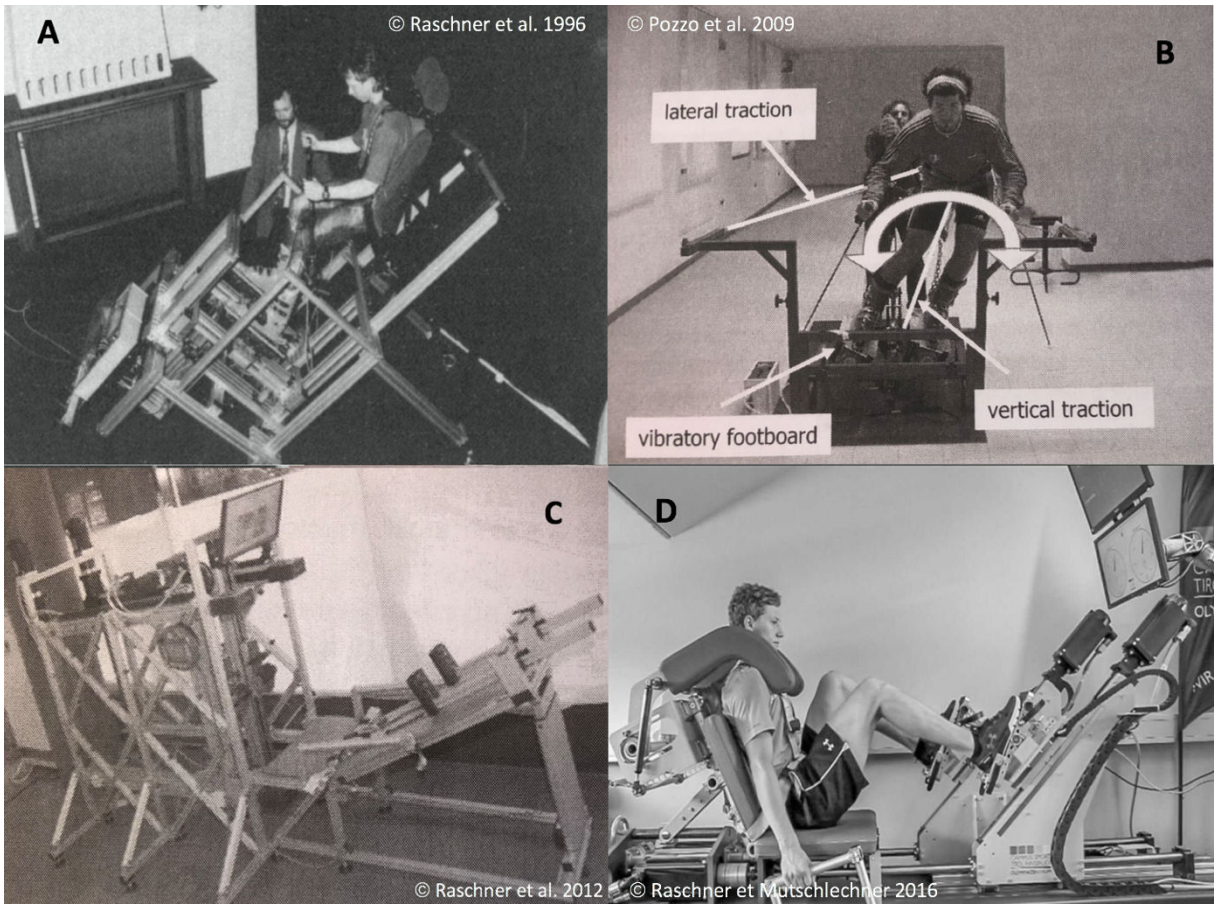


Figure 1.14 - Dispositifs développés par Raschner et al. 1996 (**A**), Pozzo et al. 2009 (**B**), Raschner et al. 2012b (**C**) et Raschner et Mutschlechner (2016) ayant pour objectifs de se rapprocher de la spécificité des contraintes biomécaniques du ski alpin *in situ*

Une des limites à la standardisation cinétique et cinématique permettant de développer des forces de réaction du sol importantes est l'appauvrissement des caractéristiques perceptivo-décisionnelles de la motricité. La motricité spécifique a pour objectif soit de stimuler l'organisme pour favoriser le transfert d'apprentissage dans l'activité *in situ*, soit de mesurer les progrès au niveau des qualités utiles *in situ*. Morrissey et al. (1995) montrent une performance accrue lors d'un test de force en conditions instables lorsque l'entraînement est réalisé en condition instable à 50% de 1 répétition maximale (RM) par rapport à un entraînement en condition stable à 70% de 1 RM, ce qui représenterait un stimulus neuromusculaire plus important mais moins spécifique. Ce serait donc la spécificité de

l'environnement perceptivo-décisionnel qui primerait dans le transfert d'apprentissage par rapport à l'intensité des contraintes mécaniques. Pour appréhender la spécificité d'une motricité, il s'agit selon Sheppard et al. (2006) d'inclure l'étude des contraintes perceptivo-décisionnelles en plus des paramètres physiologiques et biomécaniques. Par exemple, en hockey sur glace (dont le support instable génère une gestion permanente des déséquilibres latéraux et sagittaux), un test physique incluant une motricité instable (sur un pied) est davantage corrélé avec la performance (Henriksson et al. 2016). En effet, dans le domaine des neurosciences, la spécificité des stimulus perceptifs est importante puisque l'expertise de la réponse perceptivo-décisionnelle en dépend (Abernethy et Russell 1987 ; Muir 1996 ; Tenenbaum et al. 1996). En d'autres termes, si les informations perceptives sont éloignées de la spécificité de la pratique, la qualité de la réponse perceptivo-décisionnelle ne sera pas un indicateur d'expertise dans l'activité dans la mesure où l'expert n'a - dans une perspective cognitiviste - pas stocké en mémoire de réponses à des stimulus génériques (Cox 2002).

La motricité du slide sollicite une perception accrue des déséquilibres latéraux (et sagittaux dans une moindre mesure) du fait du faible coefficient de friction (inférieur à 0.10) de la surface de glisse (Puicco et al. 2015). La nécessité de créer une force latérale de déplacement couplée avec la perception de ces déséquilibres favorise la création d'une force centripète adaptée à la motricité du slide, comme à celle du ski alpin. En slide - comme lors de bonds latéraux sur trampoline - le déséquilibre est créé par une impulsion volontaire de la même manière que sur les skis. Cela signifie que lorsque la fatigue apparaît, l'individu a le choix d'impulser avec moins de vigueur - en étant moins performant - afin de créer moins de déséquilibre en vue de limiter les probabilités de chute. Ce processus perceptivo-décisionnel inconscient régule l'intensité d'effort auquel l'individu accepte d'être soumis (Noakes et al. 2004). S'accoutumer à la gestion des déséquilibres fait partie des fondamentaux du ski alpin (modèle technique FFS). Ainsi, une motricité ne saurait être spécifique du ski alpin sans inclure ces paramètres. Toutefois, la course à pied et le cyclisme sont les motricités les plus utilisées dans le cadre de la préparation physique et du testing physique des skieurs alpins (Hydren et al. 2013). Malgré le potentiel éloignement au niveau perceptivo-décisionnel du ski alpin, cette utilisation massive peut s'expliquer par la facilité d'accès, les hautes intensités permises (par la simplicité des contraintes perceptivo-décisionnelles) et la précision des mesures permises par ces motricités (vitesse, puissance). Il semblerait que la richesse perceptivo-décisionnelle soit antinomique de la standardisation de mesures. Cela n'est pas sans poser de problèmes aux préparateurs physiques et aux chercheurs s'intéressant à une activité aussi instable et variable que le ski alpin.

Gross et al. (2014) ont montré que le métabolisme aérobie jouait un rôle clé dans le débit énergétique total (63,3 ± 2,8%) lors du 90s Box test (Figure 1.13) chez des skieurs de haut niveau. Des contributions similaires du système aérobie (60 - 70%) ont été trouvées lors de GS de 72-76s (Burtscher et al. 2000 ; Grenier et al. 2012). Les concentrations sanguines en acide lactique ($[La]_s$) et consommations d'oxygène pics ($\dot{V}O_{2pic}$) mesurées étaient respectivement de 14,5 ± 0,8mmol.L^{-1} et 92,7 ± 3,5% de la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2\ max}$) (Gross et al. 2014). Ces valeurs correspondent à la fourchette haute des $[La]_s$ et $\dot{V}O_{2pic}$ mesurées lors de la pratique du ski *in situ*, respectivement 6-16 mmol.L^{-1} (Tesch et al. 1978 ; Veicsteinas et al. 1984 ; Saibene et al. 1985 ; Tesch 1995 ; Burtscher et al. 2000 ; Polat 2016) et 79-93% de $\dot{V}O_{2max}$ (Tesch et al. 1978 ; Saibene et al. 1985 ; Rognmo et al. 2002). Ces similarités pourraient laisser penser que les demandes énergétiques du 90s Box test sont spécifiques du GS. D'autre part, utilisée dans le cadre de la préparation physique des skieurs alpins, la motricité du slide n'a pas fait l'objet d'étude physiologique sur des tests rectangulaires alors que c'est la seule manière d'attester la spécificité physiologique d'un test par rapport aux demandes de compétition de ski alpin. Toutefois, Baum et al (1997) ont validé l'utilisation de cette motricité comme support de test d'effort incrémental maximal chez des skieurs alpins (paliers de 1min à 60-70-80 appuis/min puis jusqu'à épuisement et arrêt volontaire au dernier palier). D'autre part, cette motricité est historiquement largement utilisée dans le cadre de l'entraînement des patineurs de vitesse. Piucco et al. (2015, 2016, 2017) ont montré au cours d'une série de travaux la validité et la reproductibilité de la motricité du slide lors de tests physiologiques triangulaires chez les patineurs de vitesse. Par ailleurs, l'utilisation majoritaire, en préparation physique, de la course à pied et du cyclisme (Haymes et Dickinson 1980 ; White et Johnson 1991) laisserait penser à une spécificité des contraintes physiologiques par rapport au ski alpin. Toutefois, en comparaison au GS (Burtscher et al. 2000 ; Grenier et al. 2012), 49-60s de course à pied (Duffield et al. 2005 ; Hill et al. 1999 ; Zouhal et al. 2010 ; Spencer et al. 1996 ; Medbo et al. 1985 ; Nummela et al. 1995) et de cyclisme (Craig et Norton 2001) montrent une contribution supérieure du système anaérobie lactique dans le débit énergétique total. Sans comparer leurs données avec celles du ski alpin *in situ*, Sands et al. (2004) montrent des concentrations sanguines pics en acide lactique ($[La]_{pic}$) qui seraient inférieures lors du Jump test de 60s de Bosco et al. (1983) par rapport à un test de Wingate de 60s. Ces auteurs montrent également des valeurs de [La] inférieures, lors des deux tests, chez les femmes par rapport aux hommes. Dal Pupo et al. (2014), lors d'efforts d'une durée de 30s, montrent des valeurs de $[La]_{pic}$ de 8,32 ± 1,34mmol.L^{-1} et 12,79 ± 1,88mmol.L^{-1}, respectivement pour le Jump test et le test de Wingate. Spitzenpfeil et al. (2005), lors de 5 manches de durées équivalentes réalisées par les mêmes

individus, montrent que les consommations moyennes d'oxygène (VO_{2moy}) et les fréquences cardiaques moyennes (FC_{moy}) étaient supérieures lors de la pratique du ski alpin *in situ* par rapport à la motricité du Skier's Edge (Figure 1.13). Ainsi, au regard de l'ensemble de ces études, pour un effort maximal sur un temps donné, l'implication des filières énergétiques dans le débit énergétique varierait sensiblement.

Très peu d'études ont abordé la potentielle spécificité des contraintes métaboliques de motricités utilisées dans le cadre de la préparation physique et/ou de tests physiques chez le skieur alpin. Certaines motricités sont comparées entre elles, sans références au ski alpin *in situ*, d'autres sont mises en perspective avec le ski alpin *in situ* et montrent des divergences au niveau des contraintes physiologiques, d'autres encore sont analysées de manière isolée et laissent présager des similarités avec la pratique du ski alpin *in situ*.

En somme, un nombre important d'études a investigué différentes motricités sur un temps d'effort similaire aux compétitions de ski alpin. Pour autant, les analyses s'arrêtent dans la grande majorité des cas à des tests de corrélations avec le niveau de performance en ski. Si ces tests statistiques peuvent mettre en perspective l'intérêt de ces motricités, ils ne peuvent en aucun cas discriminer leur spécificité au ski alpin. Des études biomécaniques se sont attachées à développer et valider des dispositifs reproduisant les contraintes cinétiques et cinématiques du ski alpin. Si ces travaux représentent un intérêt certain au niveau expérimental, leur intérêt applicatif est fortement limité par le coût, la logistique et le fait que ces dispositifs restent à l'état de prototypes uniques. Aucune étude n'a mis en avant des motricités spécifiques du ski alpin sur le plan physiologique. Lorsque des études mesurent des variables physiologiques sur des motricités, leur spécificité au ski alpin ne peut être analysée que de manière indirecte. Il s'agit en effet de comparer les données avec les rares études physiologiques *in situ* en ski alpin, sur des populations différentes et sur des temps d'effort différents. Par ailleurs, des études ont eu la volonté d'investiguer des motricités dont les caractéristiques perceptivo-décisionnelles semblent se rapprocher du ski alpin. Toutefois, la mesure de ces paramètres reste sommaire, notamment du fait du manque d'outils permettant de mesurer les paramètres perceptivo-décisionnels *in situ*. Lorsque le prisme d'analyse est entendu d'une manière plus complexe (croisement des contraintes temporelles, biomécaniques, physiologiques et perceptivo-décisionnelles), les données sont rares ou indirectes. De plus, l'ensemble de ces rares données sur la spécificité des motricités au ski alpin ne prend comme référence que le GS. Si cette discipline est considérée comme une médiane entre SL et DH (Saibene et al. 1985 ; Grenier et al. 2012; Polat et al. 2016), les contraintes biomécaniques du SL diffèrent de celles du GS (Berg

et al. 1999 ; Spörri et al. 2012a). Comme les durées d'effort entre ces deux disciplines sont également distinctes, il est probable que les contraintes physiologiques le soient aussi.

2.3 - Facteurs psychosociologiques

La littérature scientifique relative aux facteurs psychosociologiques de performance en ski alpin reste relativement restreinte. Aussi, la majeure partie de ces connaissances est soit empirique, soit issue d'autres pratiques sportives, soit du champ de l'Education Physique et Sportive.

2.3.1 - Aspects motivationnels

Un des premiers facteurs de performance lors du processus d'accès au haut niveau sportif résiderait dans l'intégration par l'individu d'un projet sportif autodéterminé (Deci et Ryan 2002), c'est-à-dire choisi et mené par l'individu lui-même, ni par ses parents, ni par ses entraîneurs. L'auto-détermination favorise les sentiments d'autonomie et de contrôle nourrissant le sentiment de compétence. Les travaux de Ulrich et Cox (2009) mettent en évidence une corrélation entre le niveau motivationnel et le degré d'auto-détermination. Ainsi, un athlète dont le projet sportif est autodéterminé serait quotidiennement plus motivé, c'est-à-dire plus enclin à accepter la confrontation aux difficultés que sont les contraintes de l'entraînement. Moins d'auto-détermination mènerait plus facilement vers une tendance plus ou moins chronique d'évitement des contraintes désagréables. Par exemple, les sensations d'une acidose musculaire marquée sont relativement désagréables. Cela influence inévitablement les effets de l'entraînement puisque la contrainte d'entraînement planifié n'est pas totalement vécue par le sportif. En effet, l'athlète éviterait dès qu'il le peut les difficultés de l'entraînement. Des travaux en science de l'éducation montrent qu'un apprentissage autodéterminé favorise la construction de sens de la pratique et la motivation à long terme (Develay 1996). Au contraire, une motivation extrinsèque émanant d'un parent ou d'un entraîneur peut alimenter un phénomène de surjustification qui diminuerait une motivation initialement autodéterminée (Tang et Hall 1995). Ce phénomène inhibant la motivation à long terme de l'athlète peut provenir du syndrome de réussite par procuration, caractéristique des parents d'athlètes qui espèrent s'accomplir et briller à travers les performances de leurs enfants (Tofler et al. 2005). Par ailleurs, Nicholls (1989) distingue deux manières de manifester sa compétence, soit en poursuivant des buts de performance centrés sur la comparaison sociale

normative, soit en optant pour des buts de maîtrise centrés sur les progrès personnels et autoréférencés. Favoriser les buts de maîtrise permet d'épargner le sentiment de compétence, l'estime de soi et *in fine* l'engagement à long terme du sportif (Cury et Sarrazin in Delignières 2000).

2.3.2 - Gestion des émotions

Le ski alpin est un sport à risques dans la mesure où l'intégrité physique du pratiquant peut être mise à mal au cours de sa pratique. En Coupe du Monde, les vitesses peuvent atteindre 145km.h^{-1} en DH (Andersen et al. 1988 ; Bacharach et Von Duvillard 1995 ; Hintermeister et al. 2000) et même 161,9km.h^{-1} à Wengen en 2013 pour le skieur français Yohan Clarey (record en ski alpin). Ces vitesses de déplacement couplées aux protections peu imposantes et aux contraintes physiologiques, biomécaniques et perceptivo-décisionnelles peuvent expliquer un certain niveau de peur chez le skieur, notamment dans le cadre du ski loisir (Brandauer et Senner 2016). Les FC observées au départ des courses, situées entre 130 et 160bpm (Karlsson et al. 1978), seraient ainsi liées à l'anticipation, à l'anxiété et au stress psychologique (Hintermeister et al. 2000). Ainsi, il existerait une nécessité pour les skieurs alpins de gérer leurs émotions afin d'optimiser leurs performances. A ce titre, en sport de manière générale (Castro-Sánchez et al. 2018) et chez le skieur alpin loisir (Cigrovski et al. 2018), un faible niveau de peur est relié avec davantage de progrès et de performance.

2.3.3 - Gestion de l'équilibre de vie

La culture de l'entraînement du sport de haut niveau varie d'une discipline à l'autre mais reste empreinte d'une vision militaire et descendante de l'entraînement : l'entraîneur décide et ordonne tandis que l'entraîné s'exécute. Plus l'entraînement est dur, plus l'athlète serait performant. Pour aller plus loin, plus le quotidien de l'athlète est centré autour de sa pratique sportive, plus il serait performant. C'est-à-dire que l'athlète se crée une mono-identité sportive. Or, l'athlète reste avant tout un individu et, s'il est indéniable qu'il doit beaucoup s'entraîner pour se préparer convenablement à performer, il a d'autres vies que celle de sportif. Comme tout un chacun le sportif s'épanouit dans les sphères familiales, amicales, affectives, scolaires, professionnelles, spirituelles, de loisirs… Premièrement, cet épanouissement peut nourrir l'implication de l'athlète à chaque entraînement et dans une perspective de carrière à long terme. Deuxièmement, ne pas réduire sa vie à un seul objectif et une seule préoccupation (centrés autour du sport) pourrait limiter le stress colossal que représente la réussite, le bonheur

et la fierté uniquement à travers la réussite sportive. La gestion de l'équilibre de vie du sportif ne constituerait-il pas un facteur de performance souvent au moins partiellement ignoré dans la planification d'une préparation sportive ? Là où certains trouvent un équilibre de vie dans le «tout sportif» d'autres auraient davantage besoin de nuancer leurs centres d'intérêts et l'organisation temporelle subséquente.

2.3.4 - Contexte socio-culturel et géographique

Sur la base des travaux de Pociello (1995) dans le domaine de la sociologie des loisirs, le ski alpin est une pratique à dominante technologique et informationnelle dont les pratiquants sont majoritairement issus des classes sociales aisées, pour des raisons financières et surtout culturelles. Cela signifie qu'il existerait une barrière sociale déterministe au sens de Bourdieu et Passeron (1964) à l'appétence pour la pratique régulière du ski alpin. A ce frein s'ajoute un autre frein, géographique. En effet, la pratique régulière est grandement facilitée pour les populations habitant dans ou à proximité immédiate d'un massif montagneux (à l'exception des dômes artificiels comme celui d'Amnéville en France).

2.4 - Facteurs perceptivo-décisionnels

Des travaux se sont intéressés aux qualités perceptivo-décisionnelles des skieurs alpins. Toutefois, il s'agit prioritairement de mesures décontextualisées de la pratique du ski alpin *in situ*. En effet, nombre des paramètres développés ci-après sont abordés au niveau théorique, dans d'autres disciplines sportives ou en Éducation Physique et Sportive. Ce manque de connaissances scientifiques relatives aux caractéristiques perceptivo-décisionnelles du ski alpin peut s'expliquer par (i) l'environnement particulièrement varié et instable de la discipline, et (ii) les limites technologiques des outils de mesure.

2.4.1 - Approches écologique et cognitiviste

Selon une approche écologique, le skieur alpin perçoit une grande quantité d'informations d'origines variées. Le skieur agit en réponse à ces perceptions de manière à produire une motricité la plus en adéquation avec les contraintes perçues de l'environnement. Dans cette perspective, la motricité est entendue comme une réponse aux caractéristiques de l'environnement. Gibson (1958) définit le concept d'affordance comme étant la capacité à prélever de manière directe les potentialités d'action offertes par l'environnement. L'individu a directement accès aux informations contenues dans l'environnement, il perçoit pour agir comme il agit pour percevoir. Au regard de la variabilité prégnante de l'environnement du

skieur alpin (Giovanis et al. 2018), l'approche écologique occuperait une place importante dans le processus perceptivo-décisionnel. Toutefois, le skieur alpin peut également anticiper certains aspects environnants lors de la phase de reconnaissance. La reconnaissance consiste à emprunter le tracé en amont de la compétition et à très faible allure afin de repérer la physionomie du tracé et de la piste. Ainsi, le skieur garde en mémoire ces caractéristiques avant de s'élancer pour la compétition. Avant de prendre le départ, le skieur reconstitue mentalement le parcours et sa stratégie de course, notamment en termes de trajectoires. Ce processus de stockage et traitement de l'information débouchant sur une prise de décision s'apparente davantage à une approche cognitive (Schmidt 1975). Les informations stockées lors de la reconnaissance peuvent être alimentées et enrichies avant le départ par les feedbacks auditifs des entraîneurs voyant les premiers concurrents sur le tracé et/ou la vision des premiers concurrents (depuis le haut du parcours ou à la télévision). Dès lors, le processus perceptivo-décisionnel du skieur alpin se nourrirait des approches écologiques et cognitivistes. Ces théories perceptivo-décisionnelles découlent en premier lieu du fonctionnement de concert de différents canaux perceptifs.

2.4.2 - Canaux perceptifs principaux en ski alpin

Le contrôle postural est gouverné par les stimuli externes perçus par la vision, le système vestibulaire et les afférences somatosensorielles (Horak 1987). Les perceptions visuelles sont prédominantes chez l'humain (Proteau 1992 ; Golomer et al. 1999). En ski alpin, elles permettent de percevoir la qualité de neige, la dégradation éventuelle de la ligne de course, les écarts horizontaux et verticaux entre les portes. Toutefois, en ski alpin ce canal perceptif grandement sollicité est soumis aux aléas météorologiques. En effet, lorsqu'il y a du brouillard ou simplement un temps couvert, la qualité des informations visuelles est largement altérée. Le développement des afférences somatosensorielles semble occuper une place importante dans les objectifs d'entraînement du skieur de haut niveau dans la mesure où elles participent à prévenir les blessures, à améliorer le transfert de force dans le contexte écologique grâce à un meilleur placement (Kibele et Behm 2012) mais également à minimiser le risque de chute. Ce canal perceptif complexe permet de percevoir les décrochages de carres sur la neige, la dégradation de la ligne de course, les contraintes vibratoires. Ce canal perceptif jouerait un rôle important dans la performance (Malliou et al. 2004), notamment au regard d'un aspect fondamental du ski alpin: la gestion des déséquilibres.

L'équilibre statique correspond à la capacité à se maintenir avec le moins de mouvement

possible. Tandis que l'équilibre dynamique serait la capacité à réaliser une tâche en maintenant une position stable (Winter et al. 1990) ou la capacité à maintenir ou retrouver un état d'équilibre dans un environnement instable (Paillard et Noé 2006) avec le moins de mouvement possible. Chez des skieurs alpins, la proprioception dynamique (axes avant-arrière et droite-gauche) est davantage corrélée (r=0,85) avec les points FIS par rapport à la proprioception statique (r=0,54), (Fetz, 1996). Cette relation se vérifie dans d'autres sports caractérisés par une nécessité de gérer les déséquilibres. En effet, la gestion de l'équilibre dynamique des jeunes hockeyeurs est significativement corrélée avec leur vitesse maximale de patinage (Behm et al. 2005). De la même manière, Chapman et al. (2008) n'observent pas de différence d'équilibre statique bipodal entre les surfeurs de haut niveau et de niveau international. Les auteurs soulignent que la performance en surf a lieu dans une environnement instable et mouvant. Ainsi, un test d'équilibre statique n'est pas discriminant puisque non spécifique de l'activité. Les auteurs suggèrent qu'un test d'équilibre dynamique serait plus approprié. Par ailleurs, lors d'un test d'équilibre statique et dynamique réalisé en basket, les skieurs de niveau national sont moins performants que les skieurs de niveau régional. En revanche, les mêmes tests réalisés en portant des chaussures de ski ne révèlent aucune différence (Noé et Paillard 2005). Ce résultat pourrait être expliqué par la désadaptation proprioceptive au niveau de l'articulation de la cheville du fait du temps important passé dans les chaussures de ski (Noé et Paillard 2005). En effet, les chaussures de ski restreignent de manière importante la mobilité de l'articulation de la cheville (Schaff et Hauser 1989). Ce résultat pourrait également montrer l'intérêt limité de la proprioception de l'articulation de la cheville pour la performance des skieurs de haut niveau. Un autre effet serait la propension des skieurs de haut niveau à subir des entorses de la cheville dans le cadre de la préparation physiques en basket. Ainsi, si les qualités proprioceptives de la cheville ne sont pas directement pertinentes en vue de performer en ski alpin, elles permettent toutefois de limiter le risque de blessure dans le cadre de la préparation physique. Si la gestion des déséquilibres est moins facile d'accès que l'équilibre statique ou dynamique, elle semble pour autant être au cœur des qualités nécessaires pour performer en ski alpin. Il s'agit de cadrer et définir cette qualité précisément afin de l'intégrer dans les objectifs d'entraînement du skieur alpin avec pertinence. En effet, Hugel et al. (1999) soulignent la spécificité de l'apprentissage des qualités proprioceptives dans des situations données. Ainsi la gestion des équilibres dynamique et statique potentiellement développés à l'entraînement ne serait que très peu transférable dans une situation de gestion des déséquilibres en ski alpin.

2.4.3 - Adaptation de la prise de risque en fonction des enjeux

Tout processus décisionnel nécessite un positionnement sur une échelle de prise de risque. Delignières (1993) définit différents types de risques. Les risques subjectif et objectif correspondent respectivement au risque perçu par l'individu et au risque réel d'une situation. Le risque préférentiel est celui que l'individu accepte de prendre dans une situation donnée. Une optimisation de la prise de risque correspondrait ainsi à :

- Rapprocher le risque subjectif du risque objectif afin de rendre compte d'une perception plus objective de la situation ;
- Rapprocher le risque préférentiel du risque objectif afin d'optimiser les actions permises par son potentiel.

De plus, la prise de risque doit prendre en considération les enjeux, c'est-à-dire ce qu'il y a à perdre ou à gagner en cas de réussite ou d'échec (Finucane 2000). Plus il y a à gagner et moins il y a à perdre, plus le risque préférentiel devrait se rapprocher du risque objectif et ainsi augmenter. Plus il y a à perdre et moins il y a à gagner, plus le risque préférentiel devrait être en deçà du risque objectif afin de prendre une certaine marge. A ce titre, les travaux de Alhakami et Slovic (1994) montrent que des émotions positives orientent davantage vers la perception des bénéfices et des émotions négatives orientent davantage vers la perception du risque.

2.5 - Facteurs biomécaniques et neuromusculaires

2.5.1 - Influence mutuelle des contraintes biomécaniques et neuromusculaires

Les contraintes biomécaniques en termes de force de réaction du sol sont étroitement liées à la perception que le skieur a de ses capacités neuromusculaires. En effet, d'un point de vue écologique, le skieur perçoit son environnement et les options qu'il offre. Au regard de la perception de son potentiel neuromusculaire, il choisit une option qu'il juge acceptable. Les qualités neuromusculaires des skieurs leur permettent, en effet, de se confronter à des contraintes mécaniques importantes. Dès lors, les contraintes mécaniques importantes constituant l'environnement quasi-quotidien du skieur alpin stimulent et développent ses qualités neuromusculaires. Aussi, il semble pertinent d'analyser de manière concomitante les contraintes biomécaniques et neuromusculaires du skieur alpin.

2.5.2 - Contraintes biomécaniques du ski alpin

2.5.2.1 - Bilan des forces appliquées sur le skieur

Les interrelations entre l'environnement, le skieur et son matériel engendrent des contraintes biomécaniques. Lorsque le skieur évolue selon une trajectoire rectiligne dans une pente, il est soumis à des forces motrices et des forces frénatrices. La composante de traînée des forces aérodynamiques (dépendante du Cx et de la forme du skieur) et la composante de frottement des forces de contact ski-neige (dépendante des caractéristiques de la neige, de l'affûtage des carres, du fartage, de la structure de la semelle du ski ainsi que de l'angle de prise de carre) freinent l'avancée du skieur. En revanche, la force que représente le poids (produit de la masse et de la constante gravitationnelle) est motrice (Figure 1.15).

Figure 1.15 - Forces auxquelles le skieur est soumis lorsqu'il évolue selon une trajectoire rectiligne dans une pente

2.5.2.2- Forces de réaction du sol

La littérature renseigne sur les forces maximales de réaction du sol auxquelles les skieurs de haut niveau sont contraints. Celles-ci s'élèvent en GS à 2896 ± 708N pour un angle articulaire de genou de 97 ± 9° (Berg et al. 1995). D'autres auteurs rapportent des valeurs de 1500 à 3500N soit 2 à 4 fois le poids de corps (Nachbauer 1987 ; Nachbauer et Rauch 1991 ; Müller 1994 ; Babiel et al. 1997 ; Federolf 2005 ; Klous 2007 ; Gilgien et al. 2013 ; Falda-Buscaiot et al. 2017 ; Gilgien et al. 2018). Lorsque la fréquence vibratoire - pouvant atteindre 30Hz - est prise en compte, la force de réaction du sol peut atteindre des valeurs de 7000N durant des laps de temps très restreints (Spitzenpfeil 2000). Les skieurs de niveau plus élevé

seraient confrontés à des forces de réaction du sol plus importantes (Keränen et al. 2010). Sans prendre en considération l'effet vibratoire, si l'on rapporte ces valeurs de force de réaction du sol au poids de corps, on observe une contrainte sous le pied extérieur au virage équivalente à 2,7 ± 0,3 fois le poids de corps chez des skieurs de haut niveau (Smith et al. 2012). Il existe de ce point de vue des différences en fonction des disciplines (Gilgien 2014 ; Gilgien et al. 2018). Gilgien (2014) observe chez les hommes des forces de réaction du sol moyennes de 2,02N.kg^{-1} en GS, 1,58N.kg^{-1} en SG, 1,43N.kg^{-1} en DH et des forces de réaction du sol maximales de 3,16N.kg^{-1} en GS, 2,79N.kg^{-1} en SG, 2,59N.kg^{-1} en DH. La figure 1.16 décrit la répartition des valeurs de force de réaction du sol rapportées au poids de corps en pourcentage de la totalité d'une manche en GS, SG et DH (Gilgien 2014).

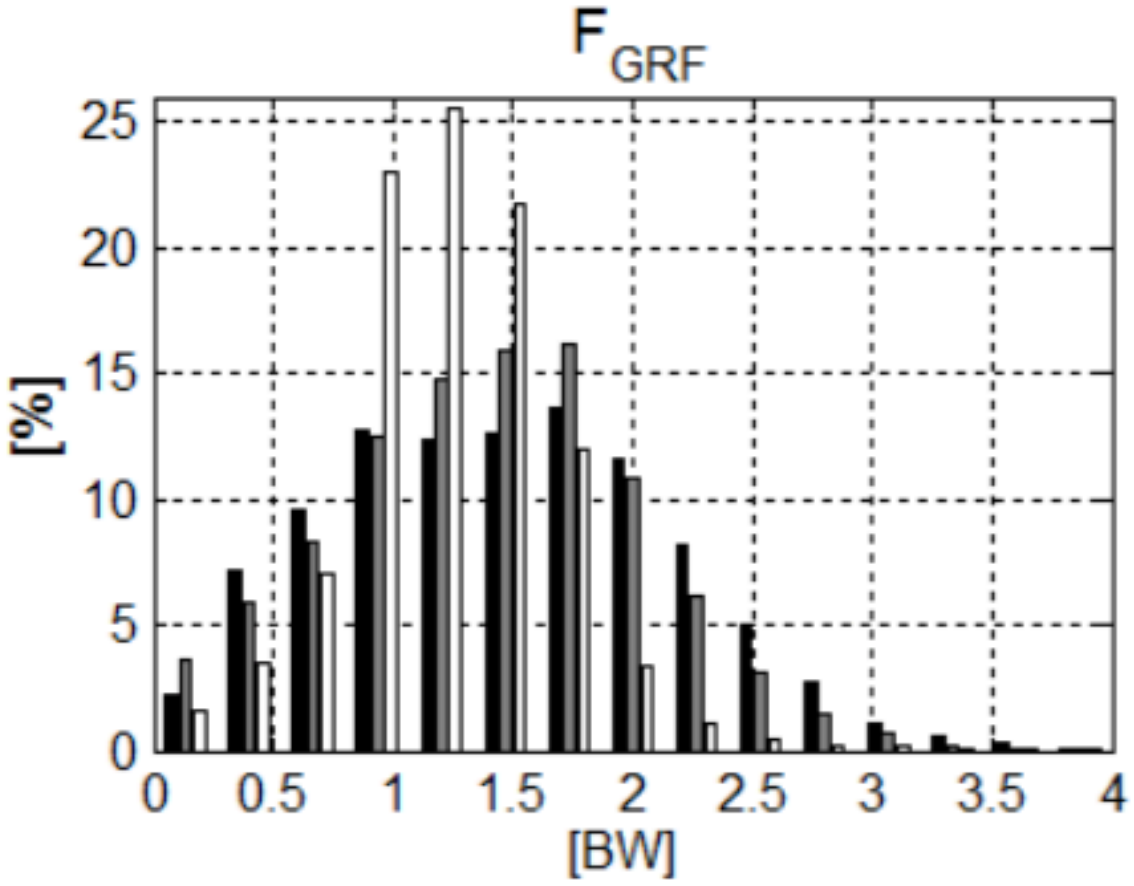


Figure 1.16 - Distribution des forces de réaction du sol, relatives au poids de corps lors de manche de GS (noir), SG (gris) et DH (blanc) (Gilgien 2014)

BW : body weight ; F_{GRF} : ground reaction force.

De plus, la littérature compare les forces de réaction du sol entre SL et GS. La force de réaction du sol pic tendrait à être plus élevée en SL qu'en GS (Spörri et al. 2016a). En GS tracé à 25m d'écart entre les portes, l'écart latéral entre les portes (6m vs 10m) ne changerait pas de

manière significative la force de réaction du sol, respectivement 1,81 ± 0,33N.kg^{-1} et 1,80 ± 0,24N.kg^{-1}. En revanche, les auteurs rapportent une force de réaction du sol plus importante en SL tracé à 10m lorsque l'écart latéral entre les portes est de 3m plutôt que 4,5m, respectivement 2,25 ± 0,36N.kg^{-1} et 2,02 ± 0,39N.kg^{-1} (Spörri et al. 2016a). Par ailleurs, Spörri et al. (2016) montrent une différence de durée d'appui entre GS et SL, respectivement 1,45 ± 0,11s et 0,90 ± 0,04s (Figure 1.17). La même étude relève également une différence de durée effective de forces maximales entre GS et SL respectivement d'environ 30% et 25% du virage.

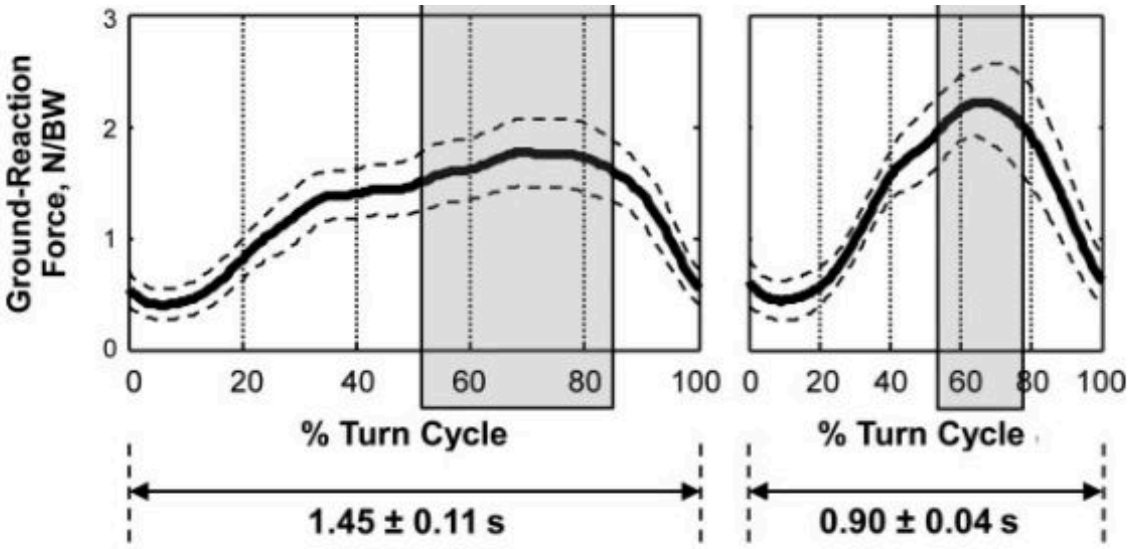


Figure 1.17 - Force de réaction du sol relative lors de virages de GS et de SL de distances entre les portes et distances horizontales respectives de 25/6m et 10/3m (Spörri et al. 2016a)

La force de réaction du sol pour un virage coupé (sans effet directionnel pivoté correspondant à un dérapage) dépend du rayon de courbure, de la vitesse, de la pente et de la masse du skieur. La force centripète orientée vers l'intérieur du virage est de plus en plus contraignante au niveau mécanique et donc musculaire à mesure que l'appui se poursuit (sans transfert de poids du corps d'un ski à l'autre) (Hintermeister et al. 1995 ; Falda-Buscaiot et al. 2017). Après le franchissement de la ligne de pente, les directions du poids et de la force centripète sont en effet de plus en plus opposées (Falda-Buscaiot et al. 2017) (Figure 1.18). Chez des skieurs de Coupe d'Europe, on observe une différence significative de force de réaction du sol en fonction des rayons de ski en GS (30m, 35m, 40m), durant la phase d'appui la plus importante après le franchissement de la ligne de pente, 2,05 ± 0,12N.kg^{-1} avec rayons de 30m, 2,02 ± 0,10N.kg^{-1} avec les rayons de 35m et 1,91 ± 0,15N.kg^{-1} avec les rayons de 40m (Spörri et al. 2016a). Toutefois, si la force de réaction du sol maximale diminue logiquement

avec l'augmentation du rayon de courbe, la durée d'appui s'allonge pour respecter les contraintes du tracé.

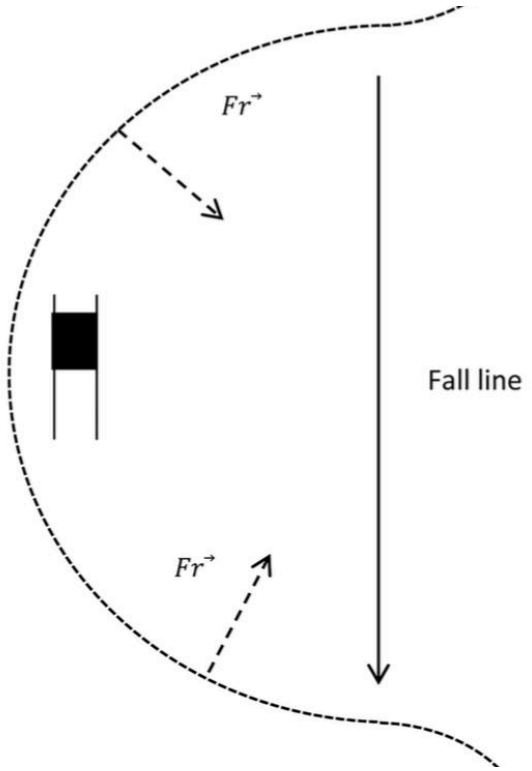


Figure 1.18 - Orientation de la force de réaction du sol par rapport à la ligne de pente (Falda-Buscaiot et al. 2017)

Fr : Force de réaction du sol.

Par ailleurs, la préparation des pistes de compétitions internationales a largement évolué ces dernières décennies. L'objectif est de tendre vers une forte densité de neige qui maintient les caractéristiques mécaniques de la piste tout au long de la compétition. L'autrichien, Christian Steinbach a développé, dans la fin des années 1990, un système permettant d'injecter de l'eau sous pression dans le manteau neigeux des pistes. Grâce au regel, cette méthode permet d'augmenter la densité de la neige en se rapprochant de celle de la glace. Parfois, la surface de la piste est arrosée à la lance à incendie pour remplacer ou compléter l'opération. Ce type de préparation de piste inhibe la dissipation d'énergie des skis dans la neige. Il en résulterait une augmentation des forces de réaction du sol et de la fréquence et/ou amplitude vibratoire. Si le paramètre de la préparation des pistes (densité du revêtement neigeux) semble empiriquement largement augmenter les contraintes mécaniques musculaires et énergétiques, aucune étude n'a pour l'heure mesuré ce potentiel phénomène. De plus, une prise de recul quant à l'influence des

outils de mesure de la force de réaction du sol est nécessaire. En effet, une plate-forme de force embarquée est plus précise mais dénature la structure donc la réaction du ski. Elle ne permet pas d'utiliser un matériel personnel ce qui peut demander un temps d'adaptation pour une motricité finale potentiellement en décalage avec celle réalisée à l'accoutumée. Les semelles à capteurs de pression plantaire ont l'avantage de permettre l'utilisation du matériel personnel des sujets. Toutefois, une partie des contraintes mécaniques ne sont pas mesurées, notamment au niveau de la surface de contact entre le tibia du sujet et la languette avant de la chaussure de ski. Ces outils permettent des comparaisons à l'intérieur d'une étude mais les mises en perspectives entre les études ne sont pas toujours réalisables.

La contrainte mécanique pic en termes de force de réaction du sol a lieu à la fin de la phase excentrique du virage (Berg et Eiken 1999 ; Lamontagne 2001 ; Müller et Schwameder 2003 ; Meyer 2012 ; Falda-Buscaiot et al. 2017). Il s'en suit alors une réduction soudaine de la charge permettant une contraction concentrique des extenseurs de genoux (Coulmy 2011). Chez des skieurs élites hommes suédois en GS, la phase excentrique de l'appui dure 1,0 ± 0,2s et la phase concentrique dure 0,5 ± 0,1s (Berg et al. 1995). Ainsi, la phase excentrique du virage est deux fois plus longue que la phase concentrique (Coulmy 2011 ; Meyer 2012). Ce type de contraction musculaire correspond à la réponse motrice des skieurs dans un contexte de forte contrainte mécanique. L'activité musculaire est plus intense lors de la phase excentrique par rapport à une phase concentrique (Berg et al. 1995 ; Berg et Eiken 1999 ; Tesch et al. 1990 ; Eloranta et Komi 1981). Aussi, générer des contractions excentriques constitue une réponse motrice pertinente. Dès lors, les forces et moments excentriques générés par les extenseurs de l'articulation du genou seraient discriminants en fonction du niveau des skieurs. Abe et al. (1992) mettent en évidence des différences de forces et moments excentriques entre des skieuses de l'équipe nationale japonaise et des skieurs de niveau scolaire. De manière intéressante, les auteurs n'observent aucune différence lorsqu'il s'agit de contractions concentriques ou isométriques (Abe et al. 1992). Pour supporter de telles forces, il est important que le skieur alpin ait le meilleur alignement squelettique couplé avec une force musculaire importante, notamment des membres inférieurs (Hintermeister et al. 2000).

L'activation musculaire traduite par la réponse EMG est corrélée avec l'intensité de la force de réaction du sol (Pozzo et al. 2009). Si l'on observe un haut niveau d'activation musculaire des jambes (quadriceps, ischios-jambiers, mollets) et du tronc en ski alpin (Hintermeister et al. 1995), le plus haut niveau d'activation musculaire se trouve au niveau du quadriceps en SL, GS et SG (Berg et al. 1995 ; Berg et Eiken 1999). L'activité musculaire sur les skis approche les intensités maximales mesurées en laboratoire, i.e., 100-150% de

contraction maximale volontaire (Berg et al. 1995 ; Berg et Eiken 1999 ; Hintermeister et al. 1997). Toutefois, la force musculaire développée varie durant la courbe. Les amplitudes EMG varient de 40% à 150% de la contraction maximale isométrique volontaire durant un virage en GS (Hintermeister et al. 1997). Une autre étude met en évidence pour des virages à rayon court de type SL des niveaux de contraction de 48% à 172% de la force maximale de contraction isométrique (Zeglinksi et al. 1998).

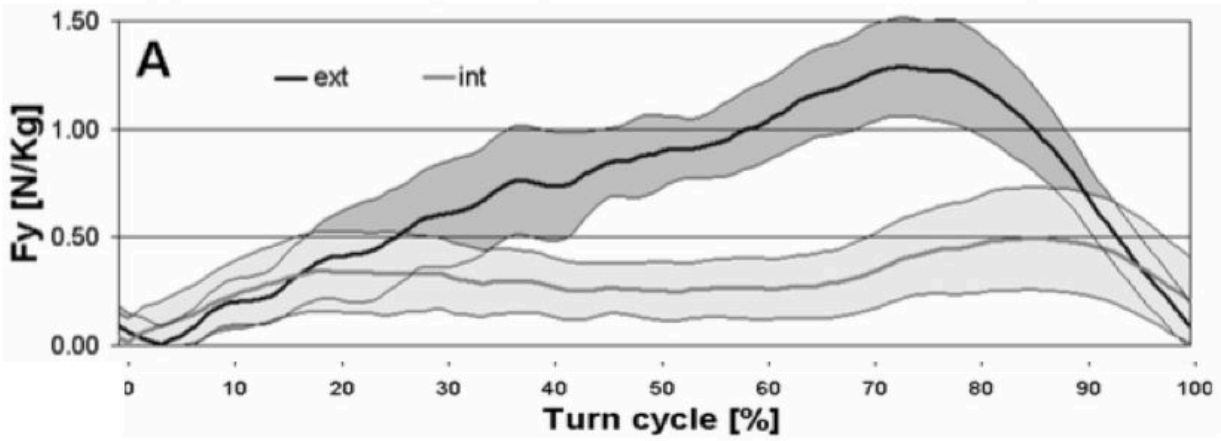


Figure 1.19 - Force de réaction du sol au niveau des skis intérieur et extérieur en GS au virage chez 3 skieurs lors de 2 virages, intervalle de confiance de 95% (zones grises) (Meyer 2012)

Fy : composante verticale de la force de réaction du sol ; ext : ski extérieur au virage ; int : ski intérieur au virage.

La réponse musculaire dépend de la pente et du type de virage. Plus la piste est pentue, plus l'activité EMG est élevée chez des skieurs loisirs (Kröll et al. 2010). Chez des skieurs experts (moniteur, coach ou skieur d'équipe nationale), on observe une activation musculaire supérieure lors de virages GS par rapport à des virages coupés de petits rayons et plus encore par rapport aux virages dérapés (Hintermeiseter et al. 1997). Par ailleurs, en ski alpin, il existe une co-contraction importante entre agonistes et antagonistes au niveau des membres inférieurs (Maxwell et al. 1989). Cette co-contraction importante des ischios-jambiers et des quadriceps suggère une composante isométrique significative et participe au maintien de l'articulation du genou (Hintermeister et al. 1995). Chez des humains, Solomonow et al. (1987) montrent que lorsque le LCA est contraint par une charge importante, un réflexe de contraction au niveau de l'ischio-jambier intervient. Ce réflexe permettrait de limiter la translation antérieure du genou (Sjolander 1989) de manière à préserver l'intégrité de la structure articulaire, notamment au niveau du LCA. Certaines études rapportent en GS une force de réaction du sol plus élevée au niveau de la jambe extérieure au virage par rapport à la jambe intérieure (Meyer 2012 ; Kröll et al. 2015b ; Falda-Buscaiot et al. 2017) (Figure 1.19). La force de réaction du sol au niveau

de la jambe extérieure serait 1,5 à 6 fois plus élevée que celle au niveau de la jambe intérieure (Nachbauer et al. 1991). D'autres auteurs rapportent une répartition de 60% au niveau de la jambe extérieure (Smith et al. 2012) ou une différence de 22,6% et 35,2% en fonction de la pente (15° vs 23°) (Nakazato et al. 2011).

De plus, une différence de force de réaction du sol au niveau du ski extérieur droit et gauche est observée sur une piste non déversente chez 7 skieurs sur 9 appartenant à l'équipe nationale Norvégienne (Smith et al. 2012). La différence de répartition de la force de réaction du sol entre le pied intérieur et extérieur au virage est significativement moins marquée en SL par rapport au GS (Kröll et al. 2015b) (Tableau 1.3). Ceci pourrait être en lien avec des contraintes mécaniques supérieures auxquelles le skieur préfère faire face davantage avec deux jambes. En adéquation avec les contraintes mécaniques appliquées, les muscles de la jambe extérieure au virage sont davantage activés par rapport à ceux de la jambe intérieure (Hintermeister et al. 1994 ; Berg et al. 1995 ; Berg et Eiken 1999 ; Kröll et al. 2009 ; Meyer 2012). Plus précisément, le vaste externe de la jambe extérieure s'active davantage par rapport à celui de la jambe intérieure mais ce n'est pas le cas pour le droit fémoral (Hintermeister et al. 1994 ; Kröll et al. 2009, 2010). Le vaste externe est actif tout le long alors que le droit fémoral est biphasique (Kröll et al. 2009).

Values of the ground reaction forces (n=22 turns per discipline; 1 BW =817N)

	TOTAL		OUTSIDE leg	INSIDE leg
	Mean	Max	Mean	Mean
Slalom [BW]	1.74±0.10	3.15±0.31	0.98±0.14	0.76±0.13
Giant-Slalom [BW]	1.95±0.15	3.15±0.21	1.31±0.16	0.69±0.11

Tableau 1.3 - Étude de cas de la force de réaction du sol en SL et GS chez un skieur de haut niveau (17.4 points FIS en SL) (Kröll et al. 2015b)

2.5.2.3 - Contraintes vibratoires

En ski alpin de haut niveau, les skieurs doivent faire face à d'importants niveaux de force de réaction du sol et de vibration (Pozzo 2005). La fréquence vibratoire provenant des mouvements des skis sur la neige varie entre 5 et 30Hz au cours de virages de petits et moyens rayons (Federolf 2009). Les vibrations varient en fréquence et en amplitude en fonction de la zone du virage, de la qualité de neige et de la zone corporelle. Les vibrations sont plus faibles au moment de la phase de déclenchement du virage (~2g) et durant la phase de glisse en trace directe (~5g) (Federolf et al. 2009). Chez des skieurs loisirs, les vibrations sont supérieures au

cours des virages dérapés par rapport aux virages coupés (Supej et Ogrin 2019). Dans les situations de virage sans dérapage (dits «coupés»), l'amplitude de fréquence vibratoire est dans la gamme de 5 à 30Hz. Quand les conditions nivologiques évoluent avec une neige moins dure, la fréquence passe à une gamme de 15 à 20Hz du fait de l'augmentation de la diffusion d'énergie dans la neige. A 10Hz, l'amplitude des vibrations est inférieure de 30% au niveau des hanches et de 20% au niveau du cou, par rapport aux valeurs mesurées au niveau de la cheville. Avec l'augmentation de la fréquence vibratoire, l'amplitude diminue. En effet, à 60Hz l'amplitude est inférieure à 12% pour la hanche et moins de 5% au niveau de la tête.

L'interface ski-neige provoque de grandes vibrations qui se propagent dans tout le corps (Mester et al. 1999). Les vibrations créent un phénomène de résonance au niveau des tissus mous. Ces vibrations ont une incidence particulière au niveau de la sphère cérébrale, des yeux, des oreilles et des autres organes sensibles (Griffin 1975 ; Zou et al. 2001 ; Federolf 2008). Ces auteurs montrent également que les vibrations ont un effet délétère sur le contrôle moteur, et donc la performance sportive, et augmentent le risque de chute et de blessure. Pour prévenir les effets négatifs des vibrations, différents systèmes à mécanismes amortissants sont présents dans le corps humain. Le système myo-articulaire des membres inférieurs permet une action d'amorti soit de manière passive avec le cartilage et les tissus conjonctifs soit activement par les caractéristiques de raideur et de compliance musculaire lors des contractions ou co-contractions. La fonction musculaire a d'ailleurs été proposée comme principal mécanisme effectif en ski alpin (Stefanyshyn et Nigg 1997 ; Nigg et Liu 1999 ; Federoff 2008). Les composantes élastiques musculaires ont été étudiées dans la course et la marche grâce à l'accélérométrie (Wakeling et al. 2003 ; Boyer et Nigg 2007). En ski, la relation entre la fonction amortissante du muscle et les vibrations a été explorée par plusieurs auteurs (Federolf 2008).

Finalement, dans le milieu sportif, il n'existe aucun règlement sur l'exposition des sportifs aux vibrations malgré l'importance des sollicitations dans certaines disciplines (ski alpin, VTT, sports mécaniques…). Ainsi, la réduction des vibrations est davantage prise en charge par les fabricants de matériel que par les pratiquants eux-mêmes. Il est à noter que les vibrations subies par les sportifs sont généralement supérieures à celles autorisées dans le milieu professionnel. Par exemple, un skieur peut être soumis à des vibrations supérieures à $5 m.s^{-2}$ alors que le seuil préventif de la norme professionnelle est de $0,5 m.s^{-2}$ (Code du Travail).

2.5.2.4 - Angles et vitesses articulaires

Chez des skieurs de 9 à 17 ans, les angles articulaires minimaux au niveau de l'articulation du genou de la jambe extérieure au virage seraient de 107,4 ± 14,4° en GS et de 118,3 ± 18,0° en SL (Szmedra et al. 2001). Selon certains auteurs, les angles au niveau des genoux et des hanches seraient plus fermés en GS par rapport au SL ce qui traduirait une position plus basse du skieur (Szmedra et al. 2001). D'autres auteurs montrent des angles au genou inférieurs lors des disciplines de vitesse. En effet, les angles au niveau de l'articulation du genou de la jambe extérieure varient de 83-96° en SG, de 86-114° en GS et de 98-111° en SL (Berg et Eiken 1999). Ces résultats s'expliqueraient par une influence accrue des forces frénatrices aérodynamiques avec l'augmentation de la vitesse de ski. Toutefois, les données concernant les angles articulaires au niveau de l'articulation du genou extérieur au virage en fonction des disciplines ne sont pas unanimes. Cela pourrait s'expliquer par l'influence importante du matériel, de la technique personnelle, du niveau des skieurs, des caractéristiques du tracé et de la piste. Toutefois, les données d'une étude de cas (Kröll et al. 2015b) permettent de comparer SL et GS chez un même skieur de haut niveau (17,4 points FIS en SL) avec le détail des angles moyens, minimaux et maximaux au niveau des articulations des genoux intérieurs et extérieurs au virage (Tableau 1.4). L'angle au niveau de l'articulation du genou extérieur au virage serait supérieur en GS par rapport au SL. De plus, l'angle au niveau de l'articulation du genou intérieur au virage serait inférieur en GS par rapport au SL.

Values of the knee angle (n=22 turns per discipline, ±SD)

	OUTSIDE leg			INSIDE leg		
	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max
Slalom [°]	112±5	81±7	132±6	101±7	80±7	118±9
Giant-Slalom [°]	122±6	95±8	138±8	88±7	67±9	113±8

Tableau 1.4 - Angles moyens, minimaux et maximaux au niveau des genoux intérieurs et extérieurs au virage en SL et GS (Kröll et al. 2015b)

En prenant également en compte l'articulation du genou de la jambe intérieure au virage, ces angles varient chez des skieurs élites suédois en GS de 66° à 114° (Berg et al. 1995). Des études de cas sur quelques skieurs (4 et 8 meilleurs mondiaux) ont été réalisées dans le milieu écologique de Coupes du Monde. Pozzo et al. (2005) montrent lors du GS de Val Badia en 2002, des angles maximaux au genou entre 170-130° et des angles minimaux au genou de 55-70° avec une amplitude potentielle de variation résultante au court du virage de 60-115°. Lors du SL de Bormio, en 2012, Pozzo et al. (2012) rapportent des angles moyens au niveau de l'articulation du genou extérieur de 130,3 ± 14,0° et des angles moyens au niveau de

l'articulation du genou intérieur de 96,1 ± 5,7°. Les angles articulaires sont inférieurs au niveau de la jambe intérieure (Nachbauer et al. 1991 ; Berg et al. 1995 ; Kröll et al. 2010). Par ailleurs, chez des skieurs de Coupe d'Europe, on observe un angle maximal dans le plan frontal entre les tibias et la surface neigeuse de 68° en GS (Spörri et al. 2016a). Ces données sont en accord avec une étude antérieure relevant un angle de 60-70° (Pozzo 2005).

L'ensemble de ces données serait à prendre avec du recul puisqu'il ne correspond qu'à des études de cas (nombre restreint de virages et de skieurs) sur un paramètre dont les variations interpersonnelles sont éminemment importantes. De plus, il serait pertinent de préciser les angles articulaires au niveau de l'articulation du genou lorsque le skieur subit les contraintes maximales durant la courbe. Pour aller plus loin, la variation de cet angle couplé au facteur temporel permettrait d'appréhender les vitesses angulaires et les angles critiques qui seraient à prendre en compte dans la préparation musculaire spécifique des skieurs. De manière générale, la capacité des extenseurs de l'articulation du genou à transférer la tension musculaire en force externe avec des angles fermés est particulièrement réduite à des angles faibles (Eloranta et al. 1980) alors qu'une telle position est caractéristique de la motricité des skieurs, notamment en GS.

Si les angles articulaires minimaux et maximaux sont à prendre en compte dans la description de l'activité, il s'agit également d'analyser les vitesses angulaires, principalement au niveau de l'articulation du genou. Chez des skieurs de haut niveau en GS, les positions angulaires au niveau de l'articulation du genou varient à une vitesse angulaire de 20-40°.s^{-1} (Berg et al. 1995). A titre de comparaison ce paramètre est d'environ 300°.s^{-1} en ski de bosses (Berg et Eiken 1999) et d'environ 900°.s^{-1} lors d'un sprint en athlétisme (Jacobs et al. 1993). Les vitesses angulaires au niveau de l'articulation du genou sont plus faibles dans les disciplines de vitesse que dans les disciplines techniques (SG<GS<SL) avec des moyennes au niveau de la jambe extérieure de 17°.s^{-1} en SG, 34 ± 2°.s^{-1} en GS, et 69 ± 11°.s^{-1} en SL (Berg et Eiken 1999). On observe une différence significative entre le GS et le SL (Berg et Eiken 1999). De manière décalée par rapport à ces données, les études de cas en Coupe du Monde de GS (Pozzo et al. 2005) et de SL (Pozzo et al. 2012) montrent des vitesses angulaires maximales au niveau de l'articulation du genou situées respectivement entre 220-110°.s^{-1} (phase excentrique) et 100-184°.s^{-1} (phase concentrique) et entre 29,7 ± 52,3°.s^{-1} et 126,9 ± 107,3°.s^{-1} en SL (sans précision des phases de contractions musculaires). Par ailleurs, lors de tests isocinétiques, les skieurs développent des forces très élevées à des vitesses angulaires faibles (30°.s^{-1}) (Brown et al. 1983 ; White et Johnson 1993 ; Tesch et al. 1995 ; Berg et Eiken 1999). En revanche, les valeurs de force relevées à 180°.s^{-1} ne sont pas meilleures que celles des athlètes d'autres activités

(White et Johnson 1993 ; Tesch et al. 1995 ; Berg et Eiken 1999) ou de skieurs de niveau inférieur. Ainsi, au regard de ces éléments, sur un continuum force-puissance, le ski alpin serait davantage une activité de force que de puissance.

2.5.2.5 - Fréquence de changement de direction

La durée d'un virage en ski alpin dépend de la discipline. En effet, la durée d'un cycle d'appui droit-gauche est de 4,1s en SG, 3,5 ± 0,6s en GS, et 1,6 ± 0,2s en SL (Berg et Eiken 1999). Plus récemment, des études rapportent des durées de virages de 0,86s en SL (Supej et al. 2011) et 1,72s en GS (Spörri et al. 2012b). Enfin, si la force maximale de réaction du sol dépend de la discipline, sa durée totale sur un appui varie également en fonction de la discipline.

2.6 - Facteurs énergétiques

2.6.1 - Filière anaérobie alactique

2.6.1.1 - Mesures in situ

La filière anaérobie alactique a pour substrat énergétique la Phosphocréatine (PCr) dont les stocks limités ne fournissent un maximum d'énergie qu'au cours des 5-7 premières secondes d'effort (Boobis et al. 1982). La resynthèse quasi-complète des stocks de PCr nécessite environ 5min (Dawson et al. 1997 ; Harris et al. 1976). Ainsi, un échauffement intensif au cours des dernières secondes avant le départ déplèterait une partie des stocks de PCr. Ceux-ci ne pourraient être utilisée au cours des premières secondes de course avec pour conséquence potentielle une diminution du débit énergétique. En effet, la filière anaérobie alactique est la filière fournissant le plus d'énergie par unité de temps (Howald et al. 1978). Aucune étude *in situ* n'a mesuré de manière directe la déplétion des stocks de PCr lors de la pratique de ski alpin. Pour cause, cette mesure nécessite une biopsie musculaire non autorisée dans le cadre d'études scientifiques dans nombre de pays. Chez le skieur alpin, les qualités anaérobies alactiques ont été appréhendées via différents tests physiques : le test des Escaliers de Margaria-Kalamen (Haymes et al. 1980), un test de sprint court en course à pied (20-50m), un test de puissance de 6s sur ergocycle (données internes FFS). Le caractère supra-maximal des tests physiques impliquant prioritairement la filière anaérobie alactique nécessite une motricité dont les coordinations sont simples (Bouchard et al. 1991).

2.6.2 - Filière anaérobie lactique

2.6.2.1 - Mesures in situ

Dans certains types d'exercices (un effort supramaximal compris entre 10 et 110s), la [La] post-exercice dans le sang peut refléter assez fidèlement la production musculaire de lactate. En revanche, pour des exercices supramaximaux d'une durée supérieure à 2min, la production n'est plus le seul paramètre déterminant de la concentration sanguine de lactate post-exercice. En effet, les valeurs de $[La]_{pic}$ obtenues lors de la récupération sont sous l'influence d'une part, des processus d'échange du lactate entre les cellules et les tissus (concept du «lactate shuttle», proposé par Brooks (1986a,b) et d'autre part, des processus d'élimination du lactate au cours de l'exercice et de la récupération. Ainsi, il apparaît que seule une partie du lactate produit par les muscles actifs est libérée dans le compartiment sanguin pendant l'exercice et la récupération (Bangsbø et al. 1990 ; Freund et al. 1984 ; Hermansen et Vaage 1977). D'autre part, au cours de l'exercice et de la récupération, le lactate libéré par les muscles actifs est distribué, via le compartiment sanguin, dans tout l'organisme : le foie, le cœur et les autres muscles actifs et inactifs. Le lactate sera métabolisé au sein de ces organes, soit dans la voie oxydative soit dans la néoglucogenèse (Ahlborg et al. 1975 ; Åstrand et al. 1986 ; Brooks 1991, 2000 ; Freund et al. 1984 ; Lindinger et al. 1995 ; Stanley et al. 1986). Aussi, la [La] est inférieure dans le milieu sanguin par rapport au milieu musculaire (Jacobs et Kaiser 1982 ; Tesch et al. 1982). Il existe également un délai de diffusion pour appréhender au niveau sanguin la [La] musculaire maximale ayant lieu au cours de l'exercice physique. Selon Bret et al. (2003), $[La]_{pic}$ intervient entre 1 et 7min après la fin de l'effort, avant de diminuer progressivement jusqu'à des valeurs de repos entre 60 et 90min post effort. Les études montrent de manière relativement consensuelle une $[La]_{pic}$ à 3min post effort (Hirvonen et al. 1987 ; Van Hall 2010).

En ski alpin de compétition, à la fin d'une manche de GS, la [La] atteint 6 à 16mmol.L^{-1} (Andersen 1988 ; Tesch 1995 ; Tesch et al. 1978 ; Saibene et al. 1985 ; Veicsteinas et al. 1984 ; Saibene et al. 1985 ; Burtscher et al. 2000 ; données internes FFS 2014, 2015 ; Polat 2016). Chez des skieurs de haut niveau, les valeurs se situeraient davantage dans la partie haute de la fourchette, i.e., entre 12 et 15mmol.L^{-1} (Neumayr et al. 2003). En effet, les [La] seraient plus élevées chez les skieurs de haut niveau (Eriksson et al. 1978). Par ailleurs, à l'issue d'un GS, les études rapportent des [La] chez les enfants de 3,2mmol.L^{-1} (Faulhaber 2007) et de 5,7 ± 2,2mmol.L^{-1} (Grenier et al. 2012) et 5,6 mmol.L^{-1} (Von Duvillard et al. 2009) chez des enfants et adolescents respectivement âgés de 8 à 14 ans, de 14 ± 0,5 ans et de 16,8 ± 1,4 ans. Les valeurs de [La] mesurées chez le skieur enfant sont inférieures à celles mesurées chez le skieur adulte. Ces observations sont en adéquation avec les travaux de Ratel et al. (2002) et Hebestreit

et al. (1996). A l'exercice court et intense, de par son immaturité, la filière anaérobie lactique présente une activité faible chez l'enfant, partiellement compensée par une activité aérobie plus importante que chez l'adulte (Ratel 2002 ; Hebestreit et al. 1996).

La littérature ne renseigne pas sur l'évolution de la [La] au cours d'un entraînement de ski alpin typiquement constitué de plusieurs manches (généralement 4 à 8 manches). En revanche, une étude présente ces résultats au cours d'un entraînement simulé, réalisé par des skieurs de haut niveau, et composé de 8 tests de Wingate modifiés d'une durée de 40s avec 12min de récupération et une résistance de 5% du poids de corps. Les résultats de cette étude montrent que [La] augmente durant les répétitions 1, 2 et 3 avant de se stabiliser jusqu'à la 8^{e} répétition, respectivement 11,1 ± 1,0mmol.L^{-1}, 13,7 ± 1,9mmol.L^{-1}, 14,3 ± 2,5mmol.L^{-1} et 14,4 ± 3,0mmol.L^{-1}. De manière opposée, la puissance développée diminue durant les répétitions 1, 2 et 3 avant de se stabiliser jusqu'à la 8^{e} répétition 670 ± 70W, 636 ± 88W, 611 ± 112W et 617 ± 607W (Hofman et al. 2000). Les données de [La] et de puissance lors de la répétition de 8 manches d'entraînement simulées renseignent sur la gestion de l'intensité d'effort. Toutefois, les contraintes environnementales entre un ergocycle et le ski alpin écologique sont incomparables au niveau biomécanique, psychologique et perceptivo-décisionnel. Les valeurs de [La] observées en ski alpin ne semblent toutefois pas maximales puisqu'elles peuvent dépasser 20mmol.L^{-1} dans le sang et 30mmol.kg^{-1} dans le muscle lors d'exercices intenses en préparation physique (Karlsson et al. 1978 ; Tesch et al. 1978 ; Andersen et al. 1990 ; Hintermeister et al. 2000). En athlétisme, Hanon et al. (2010) observent une $[La]_{pic}$ à l'issue d'un 400m de 22,0 ± 1,9mmol.L^{-1}, valeur similaire aux données historiques de la littérature (Kindermann et al. 1977 ; Lacour et al. 1990).

Nummela et al. (1992) ont observé que la performance lors d'un counter movement jump (CMJ) est diminuée de 39% après une épreuve maximale de course sur 400m, et que cette réduction est inversement corrélée à la valeur de [La] atteinte à la fin de la course. L'analyse EMG réalisée lors de cette étude a révélé que le recrutement neuromusculaire des muscles actifs des membres inférieurs avait significativement augmenté lors de la course. Ceci suggère que des unités motrices supplémentaires ont été progressivement recrutées, afin de compenser la baisse de contractilité musculaire engendrée par l'accumulation des métabolites. Les ions hydrogène produits (issus de la transformation des molécules d'acide lactique en ions lactate et en ions hydrogène (H^{+})) sont partiellement responsables de la diminution de production d'énergie mécanique (Pryor et al. 1990). Ils provoquent une chute du pH sanguin et musculaire traduisant une acidose musculaire (Spriet et al. 1989). En milieu acide, l'activité enzymatique est inhibée ce qui explique la diminution du rendement musculaire lorsque la filière anaérobie

lactique produit beaucoup d'énergie métabolique durant une période suffisante (Allen et al. 2008). Ce phénomène provoque une sensation d'inconfort marquée ainsi qu'une inhibition de la contraction musculaire (Scherr et al. 2013). Ainsi, contrairement aux idées reçues largement véhiculées à tout niveau dans le champ sportif, l'acide lactique n'est pas un déchet inhibiteur de la contraction musculaire. C'est l'accumulation de protons H^+ provoquant une acidose musculaire qui en est l'origine. La réduction du pH, comme facteur expliquant la fatigue musculaire, est cependant controversée (Bangsbo 1994, 1996). Des études ont montré que la réduction du pH, autour de 6.6, était négligeable sur l'activité enzymatique de la PFK et que cela ne réduisait pas la glycolyse (Dobson et al. 1986 ; Spriet et al. 1989). La capacité du muscle à tamponner la production d'ions H^+ permettrait de retarder la fatigue musculaire (Sharp et al. 1986 ; Bell et Wenger 1988). Cette capacité tampon des ions bicarbonate (HCO_{3-}) permettrait de supprimer 20 à 25% des ions H^+ (Hultman et Sahlin 1980). Globalement, la capacité de récupération, et en particulier l'élimination du lactate et surtout la réduction des ions H^+, semble être en rapport avec l'aptitude aérobie (Tomlin et Wenger 2001).

2.6.3 - Filière aérobie

2.6.3.1 - Tests physiques

2.6.3.1.1 - $\dot{V}O_{2max}$

$\dot{V}O_{2max}$ est l'un des indicateurs de la capacité du système de prélèvement et du transport de l'oxygène et de son utilisation au niveau cellulaire (Robinson, 1938). Elle représente la quantité maximale d'oxygène (O_2) qu'un sujet peut consommer en une minute. Elle témoigne non seulement de la capacité du système cardio-respiratoire à assurer un apport d'O_2 maximal aux muscles, mais également du degré d'utilisation de cet O_2 par les cellules musculaires. Elle peut s'exprimer en valeur absolue ($L.min^{-1}$), ou être rapportée à la masse corporelle ($mL.min^{-1}.kg^{-1}$) ou à la masse maigre ($mL.min^{-1}.kgMM^{-1}$). Pour mesurer $\dot{V}O_{2max}$, un protocole physiologiquement stressant et triangulaire (d'intensité croissante) est réalisé sur un ergomètre en laboratoire. La plupart du temps, les ergomètres sont des tapis roulants permettant d'activer une grande quantité de masse maigre au cours de l'effort (Garber et al. 2011). $\dot{V}O_{2max}$ est principalement déterminée par le volume d'éjection systolique maximal, le volume sanguin total, le taux d'hématocrite, la densité capillaire et la densité mitochondriale au niveau des muscles principalement actifs dans l'activité sportive de référence (Costill et al. 1976). $\dot{V}O_{2max}$ revêt - avec l'économie de mouvement et la stratégie d'allure - une place centrale dans la performance des sports de longue durée. Les valeurs de $\dot{V}O_{2max}$ de sportifs d'endurance «élites»

sont généralement comprises entre 5,0 et 5,5L.min^{-1} ou 70 et 80mL.min^{-1}.kg^{-1} (Billat et al. 2001 ; Lucia et al. 2000 ; Robinson et al. 1937 ; Saltin et Astrand 1967), soit 1,5-2 fois celles d'individus sédentaires. Ces valeurs sont 10% inférieures chez les athlètes d'endurance féminines de haut niveau en raison de leur plus faible hémoglobinémie et de leur plus grand pourcentage de masse grasse (Durstine et al. 1987 ; Pollock et al. 1977 ; Saltin et Astrand 1967). Par ailleurs, un virage, quant à l'importance de la filière aérobie dans le milieu du ski alpin, est marqué par la longue et prégnante domination d'Ingemar Stenmark (record de 86 victoires en Coupe du Monde à partir du milieu des années 1970) dont la $\dot{V}O_{2max}$ de 70mL.min.kg^{-1} était sensiblement supérieure à la moyenne des skieurs alpins de haut niveau (Eriksson et al. 1977). Un phénomène de tentative de compréhension parcellaire du leader mondial aurait ainsi eu lieu et sensibilisé au potentiel intérêt des qualités aérobies pour le skieur alpin.

Certaines études rapportent des valeurs de $\dot{V}O_{2max}$ de 53,4 ± 0,74mL.min^{-1}.kg^{-1} à 58,9 ± 2,2mL.min^{-1}.kg^{-1} chez les skieurs de niveau national (Saibene et al. 1985 ; White et al. 1991 ; Miura et Miura 2012). Chez les skieurs de niveau international, certaines études indiquent des valeurs de $\dot{V}O_{2max}$ de 52,7 ± 3,6mL.min^{-1}.kg^{-1} à 67,0mL.min^{-1}.kg^{-1} chez les hommes (Rusko et al. 1978 ; Karlsson et al. 1978 ; Haymes et al. 1980 ; Brown et Wilkinson, 1983 ; Veicsteinas et al. 1984 ; White et al. 1991 ; Neumayr et al. 2003 ; Impellizzeri et al. 2009 ; Breil et al. 2010 ; Zitoun-Florentin 2011 ; Gross et al. 2015) et de 46,7 ± 1,19mL.min^{-1}.kg^{-1} à 56,9 ± 3,9mL.min^{-1}.kg^{-1} chez les femmes (White et al. 1991 ; Neumayr et al. 2003 ; Breil et al. 2010 ; Zitoun-Florentin 2011). On observe ainsi une fourchette de valeurs relativement large qui peut en partie s'expliquer par la motricité utilisée lors du test de $\dot{V}O_{2max}$ (Faulkner et al. 1971 ; Buchfuhrer et al. 1983). Chez les hommes, les valeurs de $\dot{V}O_{2max}$ mesurées sur ergocycle, les plus représentatives au regard du rang mondial de la nation et de la taille de l'échantillon, réduisent la fourchette présentée entre 58,7 ± 3,2mL.min^{-1}.kg^{-1} et 59,89mL.min^{-1}.kg^{-1} pour les équipes nationales autrichienne et française, respectivement de 1997 à 2000 (Neumayr 2003) et de 1994 à 2010 (Figure 1.20) (Zitoun-Florentin 2011). De plus, une étude longitudinale d'une durée de 10 ans réalisée chez les collectifs nationaux suisses montre une augmentation d'environ 11% de la puissance maximale aérobie (PMA) concomitante d'une diminution d'environ 10% de la puissance anaérobie (Maffiuletti et al. 2009).

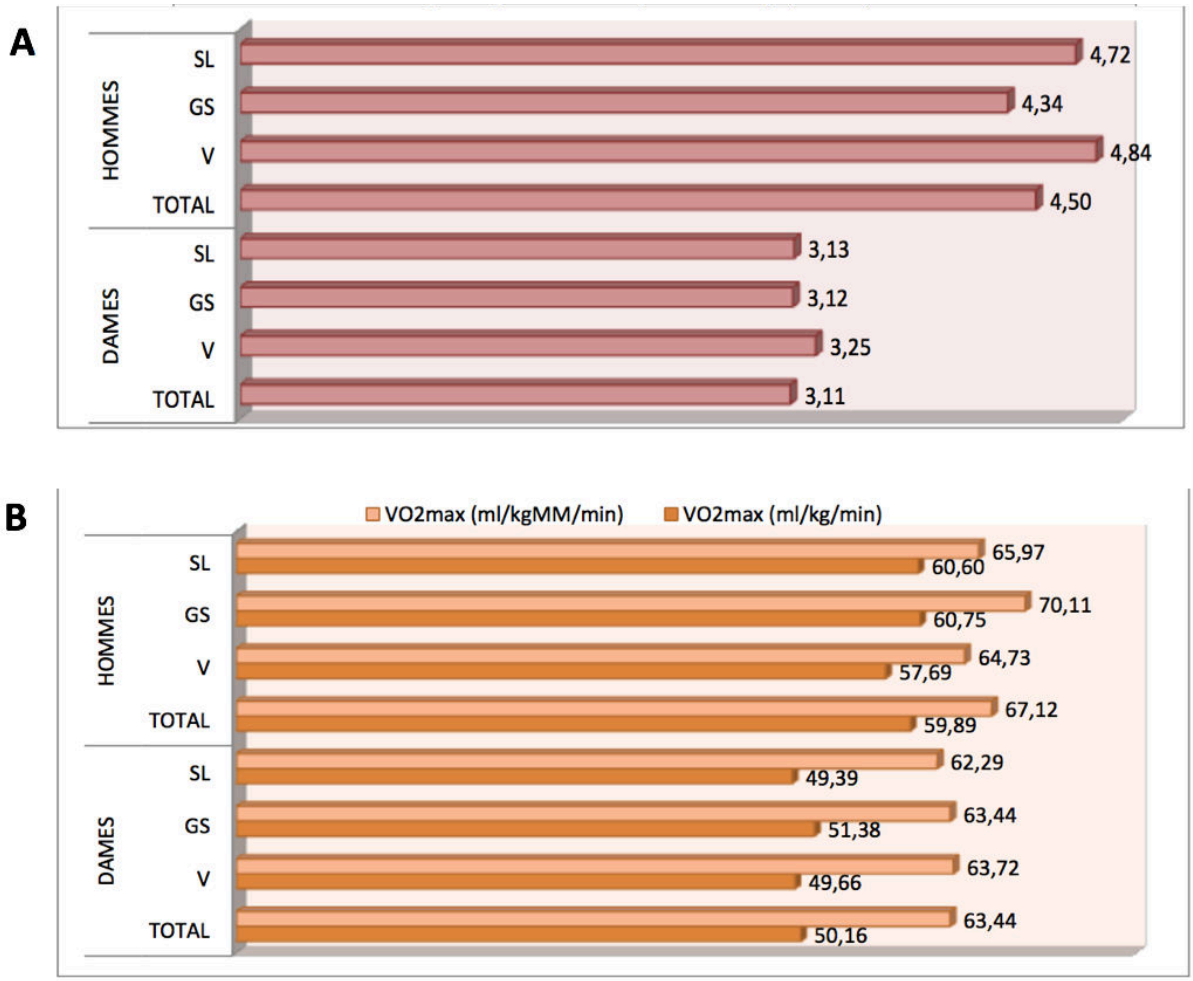


Figure 1.20 - $\dot{V}O_{2max}$ des skieurs membres des équipes de France en fonction du sexe et de la spécialité entre 1994 et 2010 exprimées en $L.min^{-1}$ (**A**) et $mL.min^{-1}.kg^{-1}$ et $mL.min^{-1}.kgMM^{-1}$ (**B**) (Zitoun-Florentin 2011)

SL : slalom ; GS : slalom géant ; V : vitesse ; $\dot{V}O_{2max}$: consommation maximale d'oxygène.

Au sein des équipes nationales françaises de 1994 à 2010, les hommes spécialistes de vitesse (DH et/ou SG) et ceux spécialistes de SL présentaient une $\dot{V}O_{2max}$ exprimée en $L.min^{-1}$ plus élevée que ceux spécialistes de GS, respectivement $4,84L.min^{-1}$, $4,72L.min^{-1}$ et $4,34L.min^{-1}$. Si $\dot{V}O_{2max}$ est rapportée au poids de corps, les spécialistes de GS et de SL présentent une $\dot{V}O_{2max}$ plus élevée que les spécialistes de DH, respectivement $60,75mL.min^{-1}.kg^{-1}$, $60,60mL.min^{-1}.kg^{-1}$ et $57,69mL.min^{-1}.kg^{-1}$ (Zitoun-Florentin 2011). En revanche, les $\dot{V}O_{2max}$ des femmes sont homogènes en fonction des spécialités qu'elles soient exprimées en $L.min^{-1}$ ou en $mL.min^{-1}.kg^{-1}$ (Zitoun-Florentin 2011) (Figure 1.20). Les hommes ont une $\dot{V}O_{2max}$ 30% plus élevée par rapport aux femmes, respectivement 4,50 vs $3,11L.min^{-1}$ (Figure 1.20). La différence entre les sexes s'atténue si l'on prend en compte la masse (16%) ou la masse maigre (5%) (Zitoun-Florentin 2011). La $\dot{V}O_{2max}$ des skieurs de haut niveau exprimée en $L.min^{-1}$

augmente fortement de 14 à 16 ans puis augmente de manière plus douce jusqu'à 25 ans avant de diminuer légèrement jusqu'à 35 ans (Figure 1.21). Chez les skieuses de haut niveau, $\dot{V}O_{2max}$ augmente légèrement et de manière croissante de 13 à 35 ans (Zitoun-Florentin 2011).

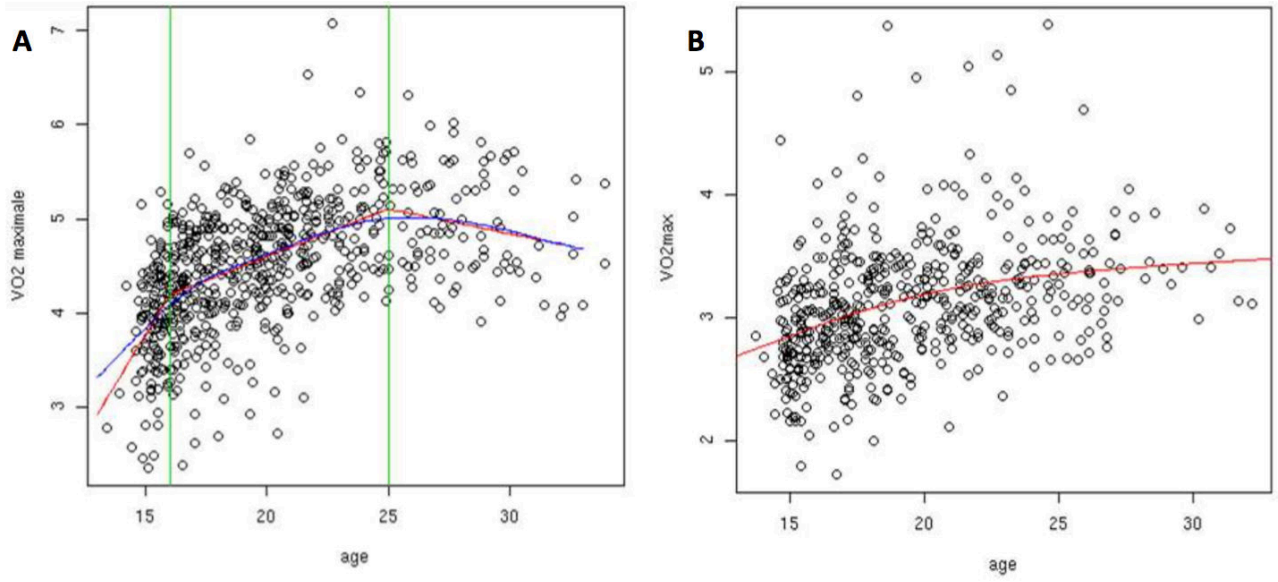


Figure 1.21 - Modélisation de $\dot{V}O_{2max}$ en fonction de l'âge des hommes (**A**) et des femmes (**B**) membres des équipes de France de ski alpin entre 1994 et 2010 (Zitoun-Florentin 2011)

$\dot{V}O_{2max}$: consommation maximale d'oxygène.

Gross et al. (2009) montrent une augmentation de $\dot{V}O_{2max}$ au cours d'une saison chez des skieurs italiens du groupe Coupe d'Europe. Les $\dot{V}O_{2max}$ augmentent de 52,7 ± 3,6mL.min^{-1}.kg^{-1} en pré-saison à 55,2 ± 5,2mL.min^{-1}.kg^{-1} en post-saison, sans changement de poids entre les deux périodes. Les données de Koutedakis et al. (1992) indiquent l'inverse en observant une diminution de $\dot{V}O_{2max}$ de 60,9 ± 3,6mL.min^{-1}.kg^{-1} à 54,9 ± 3,8mL.min^{-1}.kg^{-1} au cours de la saison compétitive. Ces résultats contradictoires pourraient être en lien avec des différences de contraintes physiologiques pendant et avant la saison compétitive entre ces populations. Toutefois, les marges de progressions de $\dot{V}O_{2max}$ sont relatives au niveau initial de $\dot{V}O_{2max}$. $\dot{V}O_{2max}$ des skieurs alpins se place à un niveau intermédiaire sur une échelle de $\dot{V}O_{2max}$ dont les athlètes situés aux extrêmes pourraient être les sprinters (55mL.min^{-1}.kg^{-1}) et les skieurs de fond (80mL.min^{-1}.kg^{-1}), (Saltin et al. 1967). Au sein des équipes de France, par rapports aux spécialistes de combiné nordique, de biathlon et de ski de fond, les skieurs alpins ont des $\dot{V}O_{2max}$ équivalentes lorsqu'elles sont exprimées en L.min^{-1}. Toutefois, elles sont significativement inférieures lorsqu'elles sont rapportées au poids de corps. Chez les femmes, quelle que soit la manière d'exprimer $\dot{V}O_{2max}$, les valeurs des skieuses alpines sont inférieures à celles des autres

disciplines (Figure 1.22) (Données internes FFS in Zitoun-Florentin 2011).

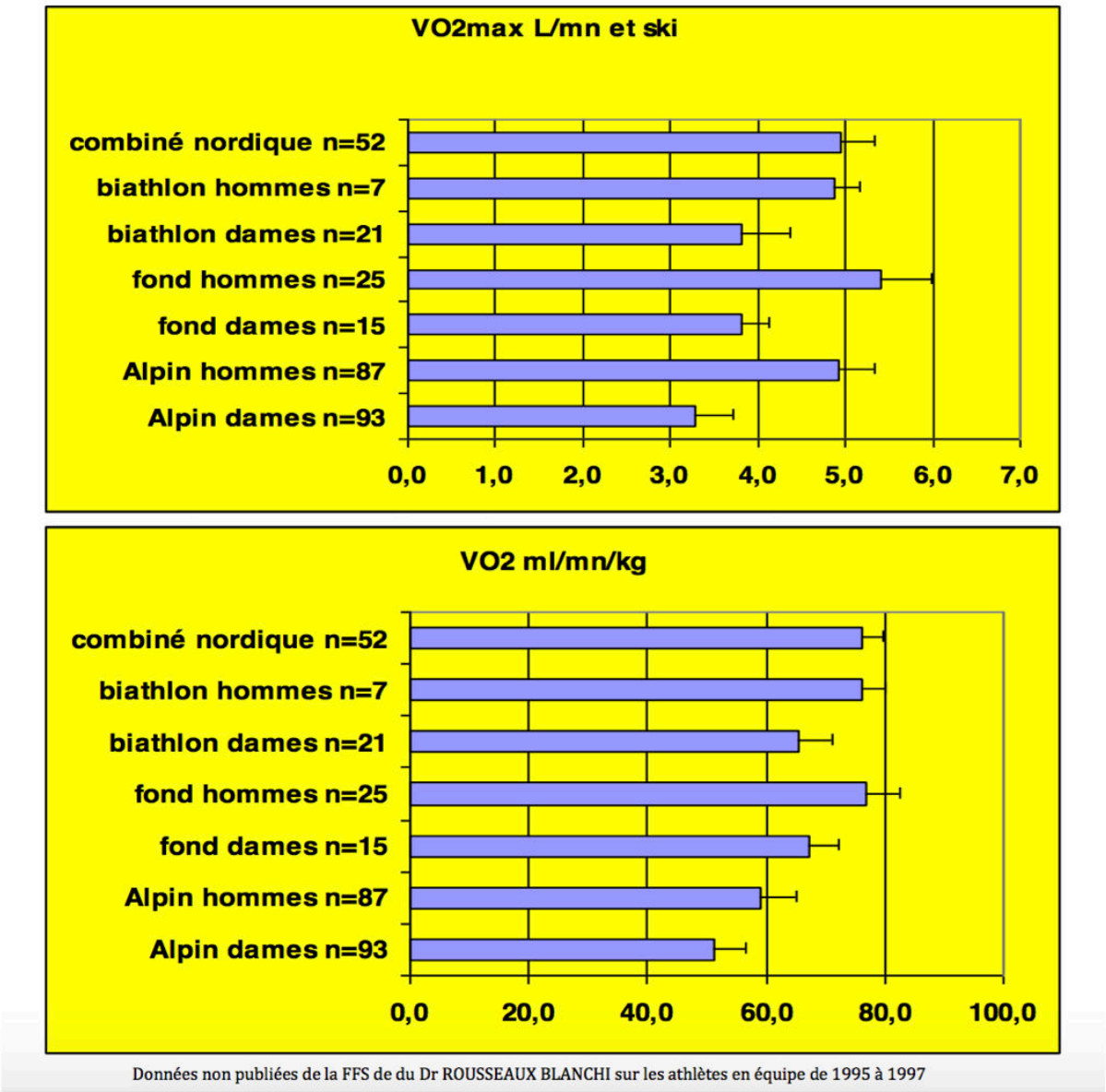


Figure 1.22 - $\dot{V}O_{2max}$ des skieurs membres des équipes de France entre 1995 et 1997 dans différentes disciplines (Données internes FFS in Zitoun-Florentin 2011)

$\dot{V}O_{2max}$: consommation maximale d'oxygène.

Le test incrémental sur cycloergomètre est le plus utilisé pour déterminer la $\dot{V}O_{2max}$ des skieurs alpins (Karlsonn 2005). La prévalence des blessures au niveau de l'articulation du genou explique une préférence pour les tests sur ergocycle plutôt que sur tapis roulant (Koutedakis et al. 1992 ; Davidson et Laliotis 1996 ; Neumayr 2003 ; Noé et Paillard 2005). En effet, les contraintes mécaniques au niveau de l'articulation du genou du genou sont inférieures sur cycloergomètre par rapport au tapis roulant. Toutefois, $\dot{V}O_{2max}$ est spécifique de la modalité d'exercice mais également de la spécialité de l'individu. En effet, la majorité des études

montrent que les coureurs atteignent de plus hautes valeurs de $\dot{V}O_{2max}$ sur tapis roulant par rapport aux cyclistes (Millet et al. 2009). Chez les triathlètes, $\dot{V}O_{2max}$ n'est pas différente entre un test sur ergocycle et un test sur tapis roulant. Ce résultat serait dû à l'entraînement actuel ainsi qu'aux activités régulièrement pratiquées par l'individu (Millet et al. 2009). Pour des individus non spécialistes de cyclisme, de triathlon ou d'activité combinée impliquant ces motricités, la valeur de $\dot{V}O_{2max}$ est plus importante sur tapis roulant que sur cycloergomètre. Cette différence est de l'ordre de 6 à 11% (Faulkner et al. 1971 ; Buchfuhrer et al. 1983 ; Froelicher et al. 1974 ; Hermansen et al. 1969 ; Kohrt et al. 1989). Plus il y a de masse musculaire impliquée dans le mouvement, plus la $\dot{V}O_{2max}$ est élevée (Reybrouck et al. 1975 ; Lewis et al. 1983). En effet, un exercice sur ergomètre à bras et à jambe permet d'atteindre une $\dot{V}O_{2max}$ 19% plus élevée par rapport à un ergomètre à jambe seulement chez des individus ayant des $\dot{V}O_{2max}$ inférieures à 45mL.min^{-1}.kg^{-1} (Reybrouck et al. 1975). Ainsi, il est nécessaire de mettre en perspective les niveaux de $\dot{V}O_{2max}$ avec le type d'ergomètre utilisé et le niveau d'entraînement dans la motricité employée.

2.6.3.1.2 - Puissance maximale aérobie

La Figure 1.23 montre des valeurs de PMA observées chez des skieurs membres des équipes de France de 1994 à 2010. Chez les hommes et les femmes, on observe des valeurs brutes de PMA inférieures chez les spécialistes de GS par rapport aux spécialistes de SL et de vitesse (Zitoun-Florentin 2011).

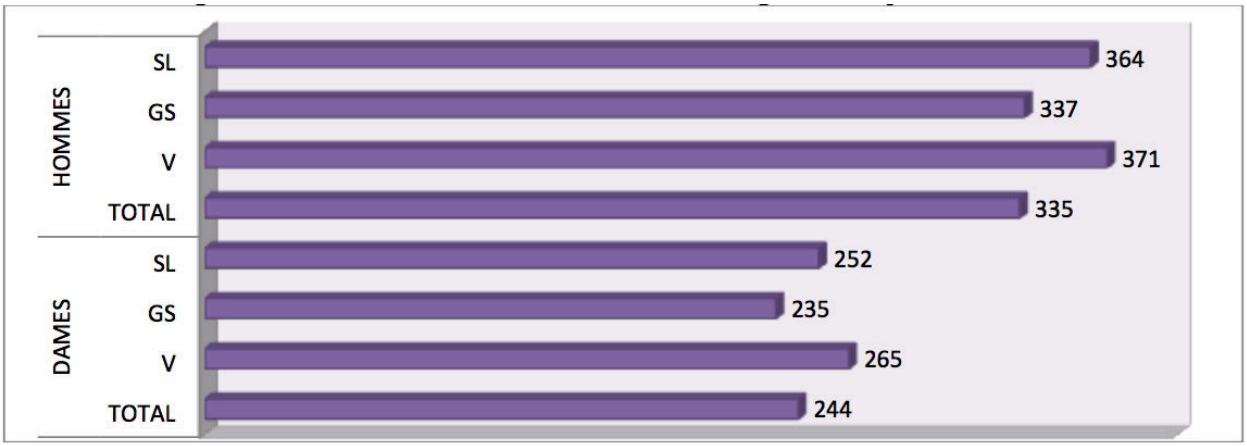


Figure 1.23 - Valeurs brutes de PMA (W) des skieurs membres des équipes de France de 1994 à 2010 selon le sexe et la spécialité (Zitoun-Florentin 2011)

SL : slalom ; GS : slalom géant ; V : vitesse.

2.6.3.1.3 - Vitesse maximale aérobie

La Figure 1.24 montre des valeurs de VMA observées chez des skieurs membres des équipes de France de 1994 à 2010. Chez les hommes, les valeurs de VMA sont supérieures chez les spécialistes de SL par rapport aux spécialistes de GS et de vitesse. Chez les femmes, ce sont les spécialistes de GS qui présentent une valeur de VMA supérieure à celle des spécialistes de SL et de vitesse (Zitoun-Florentin 2011).

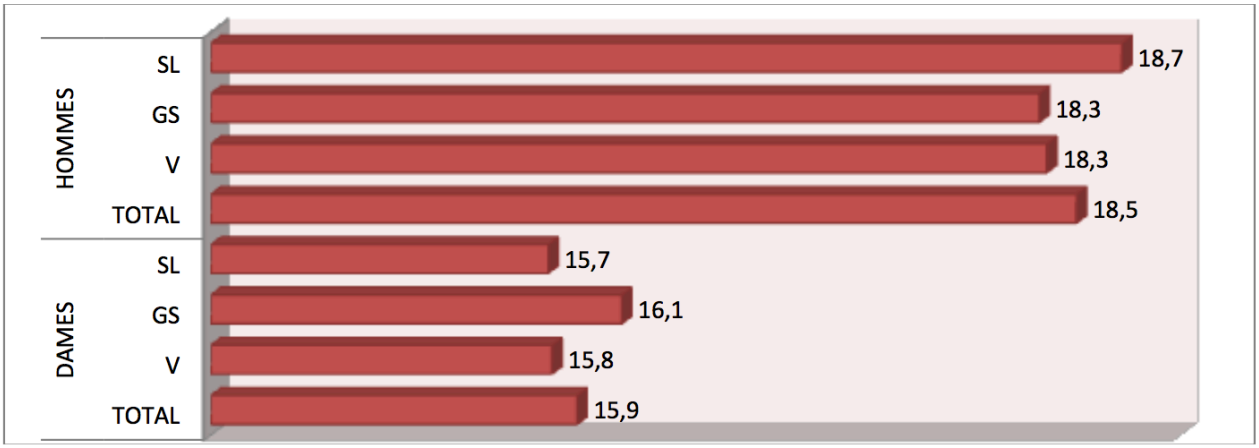


Figure 1.24 - VMA ($km.h^{-1}$) des skieurs membres des équipes de France de 1994 à 2010 selon le sexe et la spécialité (Zitoun-Florentin 2011)

SL : slalom ; GS : slalom géant ; V : vitesse.

2.6.3.2 - Mesures in situ

Il est important de souligner que la comparaison des résultats des études présentées n'est pas directement possible du fait de la standardisation inexistante des protocoles en termes de difficulté de piste (dénivelé, profil de pente, qualité de neige), de tracé (longueur, écarts latéraux et horizontaux entre les portes) et de population (niveau, âge). Aussi, les données présentées sont davantage à considérer comme une fourchette d'observation à l'intérieure de laquelle se trouve la réalité écologique du ski alpin. De plus, la diminution de $\dot{V}O_{2max}$ avec l'altitude (Mollard et al. 2007a,b ; Gore et al. 1996) n'est pas toujours prise en compte. Ainsi, les résultats de $\dot{V}O_2$ relatifs à $\dot{V}O_{2max}$ sont souvent sous-estimés, excepté lorsqu'un test de $\dot{V}O_{2max}$ a été réalisé à l'altitude des tests de ski *in situ*. A défaut, il est nécessaire de prendre en considération la part de $\dot{V}O_{2max}$ correspondant à la baisse de $\dot{V}O_{2max}$ due au différentiel d'altitude (Wehrlin et Hallén 2006).

2.6.3.2.1 - Consommation d'oxygène

Chez des adultes, certaines études montrent des valeurs de $\dot{V}O_{2moy}$, au cours d'une épreuve de GS, qui correspondent à 73,5 ± 24,6% (Spirk et al. 2012) et 74,96% (Polat 2016) de $\dot{V}O_{2max}$. Des valeurs inférieures de $\dot{V}O_{2moy}$ sont rapportées chez l'enfant et l'adolescent. En effet, chez des enfants de 14 ± 0,5ans, sur une manche de GS de 76,4 ± 10,9s, la $\dot{V}O_{2moy}$ correspond à 44,8 ± 6,2% de $\dot{V}O_{2max}$ (Grenier et al. 2012). Chez des adolescents de 16,8 ± 1,4ans en GS, une valeur de $\dot{V}O_{2moy}$ correspondant à 47,8% de $\dot{V}O_{2max}$ a été observée (Von Duvillard et al. 2009). Lors d'une épreuve de SL, Vogt et al. (2005) montrent des valeurs de $\dot{V}O_{2moy}$ égales à 67,5% et 75,6% de $\dot{V}O_{2max}$, respectivement pour les hommes et les femmes. Ainsi, la $\dot{V}O_{2moy}$ du skieur dépendrait de la discipline. Selon une étude ancienne de Karlsson (1982), la $\dot{V}O_2$ serait plus importante en GS qu'en SL et plus importante en SL qu'en DH. Les skieurs plus performants utiliseraient une part plus importante de leur $\dot{V}O_{2max}$ (Hather et al. 1991 ; Komi et al. 1977). Par ailleurs, au cours de 4min de ski libre chez des skieurs de 47,6 ± 12,4ans (avec une $\dot{V}O_{2max}$ de 39,5 ± 12,9mL.min^{-1}.kg^{-1} reflétant une condition physique relativement faible), Stoggl et al. (2016) montrent des valeurs de $\dot{V}O_{2moy}$ qui correspondent à 64% de $\dot{V}O_{2max}$ en virages dérapés, 74% de $\dot{V}O_{2max}$ en virages coupés grands rayons et à 84% de $\dot{V}O_{2max}$ en virages coupés petits rayons. D'autre part, l'influence du passage des skis droits aux skis paraboliques sur la $\dot{V}O_2$ du skieur n'est pas claire. Selon certaines études, les skis paraboliques sont à l'origine d'une augmentation de la $\dot{V}O_{2moy}$ du skieur (Rognmo et al. 2002 ; Vogt et al. 2005) alors qu'une autre étude n'observe aucune différence (Burtscher et al. 2000).

Au niveau de la $\dot{V}O_{2\ pic}$, certaines études montrent chez des adultes en GS des valeurs de $\dot{V}O_{2pic}$ correspondant à 79-95% de $\dot{V}O_{2max}$ (Saibene et al. 1985 ; Tesch et al. 1978 ; Szmedra et al. 2001 ; Rognmo et al. 2002 ; données internes FFS 2015). Chez l'enfant et l'adolescent, les études rapportent des valeurs de $\dot{V}O_{2pic}$ inférieures, à 58,1% de $\dot{V}O_{2max}$, 60% de $\dot{V}O_{2max}$ et 64,0 ± 7,8% de $\dot{V}O_{2max}$, respectivement chez des adolescents de 16,8 ± 1,4ans sur 60s (Von Duvillard et al. 2009), des enfants de 8 à 14ans sur 45s (Faulhaber 2007) et des enfants de 14 ± 0,5ans sur 76,4 ± 10,9s (Grenier et al. 2012). Les rares études réalisées en SL montrent des valeurs de $\dot{V}O_{2pic}$ similaires à celles atteintes en GS. En effet, Vogt et al. (2005) montrent des valeurs de $\dot{V}O_{2pic}$ en SL correspondant à 80-90% de $\dot{V}O_{2max}$, lors d'une manche de 45s chez des skieurs de haut niveau. De la même manière que la $\dot{V}O_{2moy}$, $\dot{V}O_{2pic}$ dépendrait du niveau des skieurs. En effet, les skieurs élites atteignent 90% de $\dot{V}O_{2max}$ en fin de manche (Tesch et al. 1978) alors que les skieurs de niveau moindre n'atteignent pas plus de 65-75% de $\dot{V}O_{2max}$ (Fosberg et Tesch données non publiées).

Lors d'une transition repos-exercice à intensité constante, la cinétique de $\dot{V}O_2$ suit une

évolution de type exponentielle pour tendre vers un état plus ou moins stable. Barstow (1994) a identifié trois phases dans l'ordre chronologique suivant : Phase 1 d'une durée de 15 à 20s après le début de l'effort, également appelée phase cardio-respiratoire ; Phase 2 correspondant à une augmentation exponentielle de $\dot{V}O_2$ pour tendre vers un état stable (Phase 3) après environ 3 à 4min d'exercice. Toutefois, des données de la littérature contrastent avec les délais des Phases 1 et 3 présentées par Barstow (1994). En natation, sur une épreuve de 100m nage libre, les résultats contrastent avec les estimations des cinétiques de $\dot{V}O_2$ publiées précédemment : $\dot{V}O_2$ augmente plus vite dans la première moitié de l'épreuve (à 50m, $\dot{V}O_2$ correspond à 94% de $\dot{V}O_{2max}$), et $\dot{V}O_{2max}$ est atteint de manière précoce au 75ème mètre de l'épreuve (Jalab 2012). En ski alpin ($t_{1/2}$ =18s en GS), la cinétique de $\dot{V}O_2$ serait plus rapide que lors d'une course à pied ($t_{1/2}$ = 26s) d'une durée de 80s réalisée sur tapis roulant à une intensité égale à 120% de $\dot{V}O_{2max}$ (Saibene et al. 1985). Selon la revue de littérature de Gastin (2001), 30 à 60s sont nécessaires pour atteindre 90% de $\dot{V}O_{2max}$ (Katch et al. 1973 ; Kavanagh et Jacobs 1988 ; Gaesser et Poole 1996 ; Gastin et Lawson 1994 ; Granier et al. 1995 ; Poole et Richardson 1997). Ainsi, certaines études montrent l'atteinte de 90% de $\dot{V}O_{2max}$ à la fin d'un test de Wingate de 30s (Smith et al. 1991) et l'atteinte de $\dot{V}O_{2max}$ à 60s lors d'un test de Wingate de 90s (Serresse et al. 1988). Au cours d'une simulation d'un 800m, des athlètes atteignent $\dot{V}O_{2max}$ à 45 ± 11s (Thomas et al. 2005). Enfin, Hanon et al. (2010) montrent une $\dot{V}O_{2pic}$ de 94% de $\dot{V}O_{2max}$ au cours d'un 400m en athlétisme. Cette valeur est plus élevée que celles relevées lors d'études antérieures : 82% (Duffield et al. 2005) et 89% (Spencer et al. 1996). Même si $\dot{V}O_{2max}$ n'est pas atteint (pour le 400m), une diminution de $\dot{V}O_2$ est observée lors de la phase terminale d'un 400m en athlétisme (Hanon et al. 2010), d'un 800m en athlétisme (Thomas et al. 2005) et d'un 100m en natation (Jalab, 2012). Dans d'autres publications, les figures suggèrent également cette chute, même si elle n'est pas discutée par les auteurs (Bishop et al. 2002 ; Zamparo et al. 1999). Ce résultat remet en cause l'idée très répandue selon laquelle, au cours des épreuves supramaximales, $\dot{V}O_2$ tend à augmenter continuellement jusqu'à $\dot{V}O_{2max}$ et à s'y maintenir si l'épreuve est assez longue (Jalab 2012). Cette diminution de $\dot{V}O_2$ pourrait être en lien avec la diminution d'intensité observée en fin d'épreuve.

2.6.3.2.2 - Fréquence cardiaque

Des études ont utilisé FC en se basant sur la relation linéaire entre FC et $\dot{V}O_2$ afin d'appréhender l'intensité d'effort en ski alpin (Andersen et Montgomery 1988 ; Kahn et al. 1993). Toutefois, cette relation entre FC et $\dot{V}O_2$ est valable pour un exercice de longue durée et d'intensité continue ce qui n'est pas le cas du ski alpin (Astrand et Rodhal 1986b ; Veictseinas

et al. 1984). De plus, FC peut être influencée par l'altitude, la température ainsi que le niveau d'anxiété (Kuno et al. 1994 ; Koistinen et al. 1995 ; Haman et al. 2002 ; Glaister 2005 ; Seifert et al. 2005). En effet, certains auteurs ont montré, au départ de manche de ski alpin, des valeurs de FC de l'ordre de 130 à 160 bpm (Karlsson et al. 1978) qui pourraient être expliquées par l'anticipation, l'anxiété et le stress psychologique (Hintermeister et al. 2000). La FC dépend également du type de virage réalisé lors de la pratique du ski libre. En effet, lors de 4min de ski libre, chez des skieurs de 47,6 ± 12,4 ans, Stoggl et al. (2016) montrent des FC_{pic} de 138 ± 4bpm en virages dérapés, de 154 ± 4bpm en virages coupés à grands rayons et de 162 ± 3bpm en virages coupés à petits rayons. Dans un cadre compétitif de ski alpin, à une altitude de 2850m, la fréquence cardiaque maximale (FC_{max}) serait atteinte au bout de 30-40s de course en SL et en GS (Veictseinas et al. 1984). D'autres études montrent également l'atteinte de FC_{max} chez des skieurs de haut niveau dans toutes les disciplines (Astrand et al. 1986a ; Tesch 1995). Toutefois, certains autres auteurs observent une FC_{pic} en fin de manche d'un niveau égal à 90-95% de FC_{max} (Karlsson et al. 1978 ; Richardson et al. 1993 ; Grenier et al. 2012).

2.6.4 - Facteurs influençant l'implication des filières énergétiques

La contribution des différentes filières énergétiques à la production d'énergie varie selon l'intensité et la durée de l'effort. Toutefois, l'ensemble des filières fonctionne de manière synchrone (Howald et al. 1978). Dès lors, si le fonctionnement d'une filière est inhibé, cela se répercute de manière compensatoire et mécanique sur la contribution des autres filières. C'est pourquoi pour comprendre le comportement d'une filière énergétique dans un contexte contraint donné, il s'agit d'analyser les facteurs qui influencent l'implication des autres filières énergétiques.

2.6.4.1 - Environnement hypoxique

En altitude réelle, la diminution de la pression barométrique implique une diminution de la densité de l'air ambiant, ce qui induit une raréfaction de l'O_2 tout en maintenant la fraction inspirée en O_2 à 20,9% (Dill et Evans 1970). En altitude, la baisse de la pression en oxygène de l'air inspiré (PIO_2) va donc se répercuter sur l'ensemble du trajet de l'O_2 dans l'organisme, i.e., des poumons jusqu'aux muscles (Calbet et al. 2003). Lorsque l'altitude augmente, $\dot{V}O_{2max}$ diminue du fait de la diminution de PIO_2 (Fulco et al. 1998). Certaines études montrent une diminution de 30% de $\dot{V}O_{2max}$ à 4500m pour les athlètes entraînés (Mollard et al. 2008) et de 47% de $\dot{V}O_{2max}$ à 5300m (Calbet et al. 2003). A faible et moyenne altitude (au-dessous de

2500m), le principal mécanisme à l'origine de la baisse de $\dot{V}O_{2max}$ est la diminution de la saturation en oxygène (SpO_2). Toutefois, comme il ne semble pas y avoir de corrélation entre la diminution de SpO_2 et celle de $\dot{V}O_{2max}$, d'autres mécanismes seraient impliqués, comme la réduction du débit sanguin maximal (Calbet et al. 2003). A très haute altitude (5300m), 3 mécanismes d'importances relativement similaires sont à l'origine de la diminution aiguë de $\dot{V}O_{2max}$: la réduction de PIO_2, l'altération des échanges gazeux au niveau pulmonaire et la réduction du débit cardiaque maximal (Calbet et al. 2003). Lorsque l'altitude augmente, PIO_2 diminue ce qui induit une diminution de pression alvéolaire en O_2 (PAO_2). Or la diffusion alvéolaire dépend du gradient de pression entre la PAO_2 et la pression partielle en O_2 dans le sang artériel (PaO_2). En altitude, la diminution de la PAO_2 conduit donc à une diminution du gradient de pression en O_2 de part et d'autre de la barrière alvéolo-capillaire (Figure 1.25), ce qui entraîne une diminution de la vitesse d'équilibration des pressions partielles et donc de PaO_2 et de SaO_2. Ainsi, la quantité d'O_2 contenue dans le sang est réduite (mécanisme d'hypoxémie) (Calbet et al. 2003 ; Fulco et al. 1998).

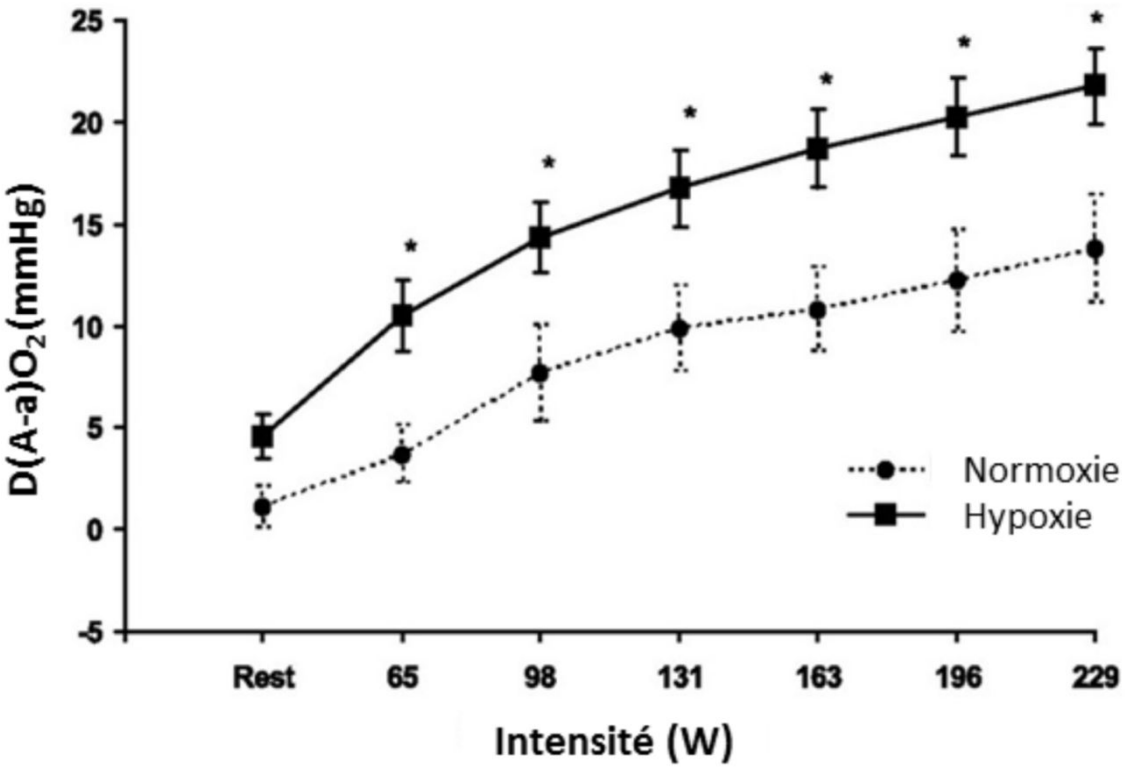


Figure 1.25 - Différence alvéolo-capillaire de pression partielle en O_2 au cours de l'exercice en plaine et à 4300m (Lovering et al. 2008)

$D(A\text{-}a)O_2$: différence alvéolo-capillaire de pression partielle en oxygène

Le débit cardiaque ($\dot{Q}$) est le produit du volume d'éjection (VES) systolique par FC. La diminution de $\dot{Q}_{max}$ s'expliquerait notamment par la diminution du volume plasmatique (en lien

avec la déshydratation développée au chapitre 2.6.4.4.) et de FC_{max} (Calbet et al. 2003). A 2700 m, chez six athlètes spécialistes d'endurance, Peltonen et al. (2001) ont mesuré une diminution significative de FC_{max} (177 ± 15 vs 186 ± 10 bpm) par rapport à des conditions d'hyperoxie. Pour Benoit et al. (1995), FC_{max} passe de 193 ± 6bpm au niveau de la mer à 179 ± 6bpm à 5300m d'altitude. Dès lors, il s'agit de comprendre dans quelle mesure et à partir de quelle altitude cette diminution de $\dot{V}O_{2max}$ a lieu. Dans les années 60, Buskirk et al. (1967) suggéraient qu'il n'y avait pas de diminution de $\dot{V}O_{2max}$ avant 1500m d'altitude. 15 ans plus tard, la même équipe révisait à la baisse ce seuil aux alentours de 1200m (Squires et Buskirk 1982). La seconde étude se différencie de la première dans la mesure où les sujets sont moyennement entraînés plutôt que sédentaires. Dès lors, le seuil à partir duquel $\dot{V}O_{2max}$ diminue ne serait pas le même pour tout le monde, notamment en raison du niveau d'entraînement. Selon Terrados et al. (1985), les sujets entraînés ont un seuil plus bas par rapport aux sujets sédentaires (900m vs 1200m). De manière proche, chez les sujets sédentaires, la diminution de $\dot{V}O_{2max}$ a été montrée à partir de 1000m (Mollard et al. 2007a,b). Ces résultats sont en accord avec ceux de Squires et Burkik (1982) et Gore et al. (1996) qui soutiennent la thèse d'un effet seuil d'altitude. En revanche, 3 études ont montré une diminution de $\dot{V}O_{2max}$ même à faible altitude (750-900m) (Gore et al. 1996, 1997 ; Terrados et al. 1985) indiquant que la diminution de $\dot{V}O_{2max}$ est linéaire de basse altitude jusqu'à 3000m. Une régression des données provenant de 11 études sur des athlètes entraînés en endurance montre une réduction linéaire de $\dot{V}O_{2max}$ avec l'hypoxie dès le niveau de la mer (figure 1.26) (Wehrlin et Hallén 2006). Ces données vont à l'encontre de l'idée selon laquelle il existerait un seuil d'altitude en deçà duquel on n'observe pas de diminution de $\dot{V}O_{2max}$. Les auteurs observent une diminution quasi linéaire de $\dot{V}O_{2max}$ à raison de 6,3% tous les 1000m d'altitude. Ainsi, la linéarité de la diminution de $\dot{V}O_{2max}$ avec l'altitude permettrait d'extrapoler $\dot{V}O_{2max}$ pour une altitude donnée à partir d'une valeur de $\dot{V}O_{2max}$ mesurée au niveau de la mer.

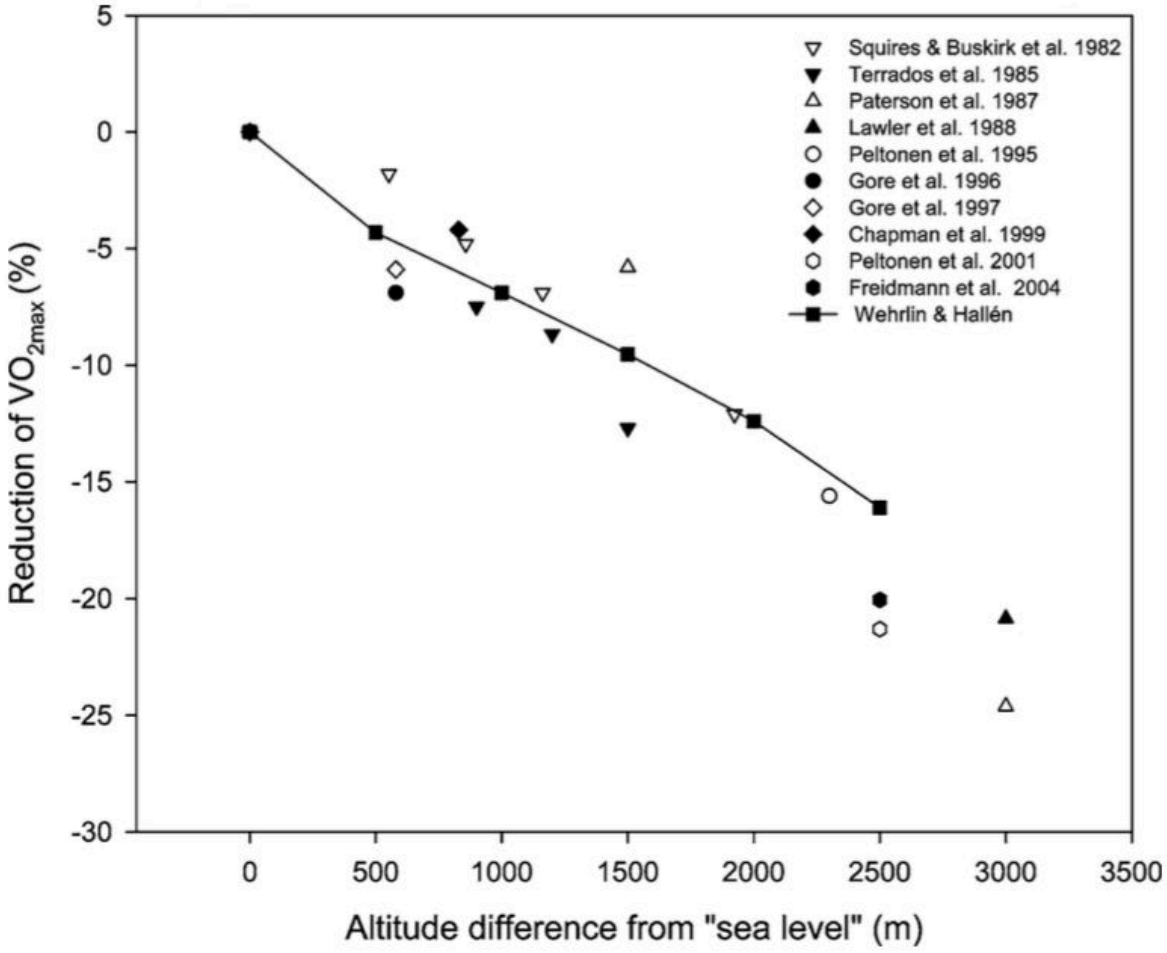


Figure 1.26 - Synthèse des études sur le pourcentage de diminution de $\dot{V}O_{2max}$ en fonction de l'altitude chez des athlètes non acclimatés dont les $\dot{V}O_{2max}$ sont supérieures à 60mL.mn^{-1}.kg^{-1} (Wherlin et Hallén, 2006)

D'autre part, la diminution de $\dot{V}O_{2max}$ avec l'altitude montre une variation interindividuelle importante (Koistinen et al. 1995 ; Lawler et al. 1988). Les raisons de cette disparité des réponses interindividuelles ne sont pas claires. Toutefois, le niveau d'entraînement en endurance ($\dot{V}O_{2max}$ supérieure à 60mL.mn^{-1}.kg^{-1}) induit une diminution plus marquée de $\dot{V}O_{2max}$ avec l'altitude par rapport à des individus non entraînés (Gavin et al. 1998 ; Koistinen et al. 1995 ; Lawler et al. 1988 ; Mollard et al. 2007a). Lawler et al. (1988) ont calculé un coefficient de corrélation de 0,94 entre $\dot{V}O_{2max}$ mesurée en plaine et la baisse de $\dot{V}O_{2max}$ en altitude. Ce phénomène serait dû au fait que les athlètes entraînés en endurance connaissent une désaturation en O_2 à partir d'altitudes basses, proches du niveau de la mer (Chapman et al. 1999 ; Gore et al. 1996 ; Terrados et al. 1985). Dès lors, il y aurait une plus grande diminution de SpO_2 lors d'un exercice maximal (77,5 ± 9,0% vs 67,0 ± 7,1%) en condition hypoxique (13% d'O_2 dans l'air ambiant) chez des individus entraînés par rapport aux individus non entraînés (Martin et O'Kroy 1993). Ainsi, Mollard et al. (2008) montrent une diminution de 30% de

$\dot{V}O_{2max}$ à 4500m pour les athlètes entraînés contre moins de 21% pour les individus non entraînés. De la même manière Martin et O'Kroy (1993) montrent, dans des conditions hypoxiques (13% d'O_2 dans l'air ambiant), une diminution de $\dot{V}O_{2max}$ de 26,0 ± 2,3% contre 14,9 ± 5,1% respectivement chez des individus entraînés et non entraînés. En somme, la part de diminution de $\dot{V}O_{2max}$ en condition hypoxique est d'autant plus conséquente que l'individu a une $\dot{V}O_{2max}$ élevée.

L'ensemble de ces mécanismes physiologiques conduisent à une diminution de $\dot{V}O_{2max}$ qui inhibe la contribution de la filière aérobie. En condition hypoxique, lors d'un exercice de temps limite (T_{lim}) (durée maximale d'effort à une intensité fixe) à 107% de $\dot{V}O_{2max}$, Wherlin et Hallén (2006) montrent une diminution de $\dot{V}O_2$ par rapport à des conditions normoxiques, malgré une augmentation de la ventilation (Tipton et al. 2017). Ces auteurs montrent également que la [La] reste stable alors même que le temps d'effort diminue. Cela se traduit par une augmentation de la contribution de la filière anaérobie lactique à la production d'énergie en compensation de la diminution de l'activité de la filière aérobie due aux conditions environnementales. Lador et al. (2013) observent le même phénomène lors d'un exercice, d'une durée de 10 min, réalisé en hypoxie (FIO^2 = 11%) et à une faible intensité (100W). Par rapport à des conditions normoxiques, $\dot{V}O_2$ reste stable et [La] augmente significativement traduisant une augmentation de la contribution de la filière anaérobie lactique à la production d'énergie. Les travaux de Stainsby et al. (1990), lors d'une répétition de contractions à 1Hz pendant 30min, vont également dans le sens d'une augmentation de [La] en condition hypoxique. De plus, au cours d'un exercice de pédalage à 120% de $\dot{V}O_{2max}$ réalisé à 2000m d'altitude, l'implication de la filière anaérobie lactique augmente de 15% par rapport au niveau de la mer (Gladden et Welch 1978 in Saibene et al. 1985).

2.6.4.2 - Contraintes ischémiques

Une ischémie musculaire représente la diminution du débit sanguin au niveau musculaire. Une posture basse (Figure 1.27), caractéristique de la motricité des skieurs alpins, favorise une ischémie musculaire, notamment au niveau des quadriceps très sollicités lors de ce type d'effort (Szmedra et al. 2001). Certains auteurs montrent en effet, chez des juniors très entraînés en ski alpin, une réduction de SpO_2 des quadriceps en GS et SL (Szmedra et al. 2001 ; Berg 1999 ; Von Duvillard 2005). Cette réduction serait plus grande en GS qu'en SL, notamment du fait des angles au genou inférieurs en GS (Szmedra et al. 2001).

Figure 1.27 - Position basse d'un skieur élite en SL

Dès lors, puisqu'une ischémie musculaire diminue l'oxygénation musculaire (Hogan et al. 1994, 1996), l'utilisation de la voie métabolique aérobie est limitée (Tesch 1995 ; Seifert et al. 2005). Afin de conserver le débit énergétique, il existe un phénomène compensatoire dans l'implication des filières énergétiques (Howald et al. 1978). Ainsi, l'ischémie musculaire du skieur inhibant l'implication de la filière aérobie conduirait à une augmentation de la glycogénolyse (Tesch et al. 1978 ; Foster et al. 1999 ; Rundell 1996 ; Berg 1999) et *in fine* à une augmentation de l'acidose musculaire (Undgren et al. 1988 ; Suga et al. 2009). De plus, le type de contraction musculaire est un facteur d'ischémie musculaire (Perrey 2003 ; Jones et Poole 2005). Ce sont les contractions musculaires de type isométriques et excentriques (Szmedra et al. 2001) qui favorisent le plus les ischémies musculaires. En ski alpin, bien que l'on observe des contractions musculaires de type concentrique, isométrique et excentrique, il est maintenant communément admis que le régime excentrique est prédominant dans la réalisation d'un virage de compétition (Coulmy et al. 2010 ; Coulmy 2011 ; Meyer 2012). Plusieurs auteurs ont par ailleurs mis en avant l'intérêt des exercices excentriques pour ce sport (Berg et al. 1995 ; Berg et Eiken 1999 ; Vogt et Hoppeler 2014). Ainsi, la perfusion en O_2 des muscles (principalement des membres inférieurs) est inhibée par les types de contractions musculaires caractéristiques du ski (Hintermeister et al. 2000). De plus, les vitesses angulaires

observées en ski alpin sont largement plus faibles que dans les activités explosives : de 20-70°.s^{-1} jusqu'à 120°.s^{-1} contre 900°.s^{-1} au cours de la phase d'appui d'une course à pied à intensité maximale. Les contractions excentriques prédominantes et lentes favorisent une ischémie musculaire localisée au niveau des membres inférieurs des skieurs. Stöcker et al. (2016) montrent que la désoxygénation sanguine (reflétant l'oxygénation musculaire) est supérieure lors des phases de décharges mécaniques en SG et DH.

Le niveau d'intensité des contractions musculaires est également un facteur d'ischémie musculaire (Sjøgaard et al. 1988 ; De Ruiter et al. 2007). Ce phénomène d'ischémie a lieu à des niveaux d'intensité de contraction des extenseurs de l'articulation du genou bien plus faible qu'on ne le pensait (Sadamoto et al. 1983). En effet, l'ischémie apparaît à 25% de la force maximale volontaire dans les vastes externe et interne et à 35% de force maximale volontaire au niveau du droit antérieur (De Ruiter et al. 2007). En ski alpin, les contractions musculaires sont particulièrement intenses et peuvent atteindre 30-50% de la force maximale de contraction volontaire (Hintermeister et al. 2000). Ainsi ces niveaux d'intensité de contraction musculaire seraient largement à même de faire obstacle à la perfusion des tissus musculaires en ski alpin. De manière analogue, les contraintes vibratoires caractéristiques du ski alpin (Mester et al. 1999 ; Federolf et al. 2009) seraient également à l'origine d'ischémies musculaires (Wahl et al. 2009). De plus, des auteurs ont observé une diminution du pH dans des conditions de vibration (25Hz) et d'occlusion par rapport à des conditions uniquement vibratoires ou uniquement d'occlusion (Haller 2007 in Mester et al. 2009). L'ensemble de ces résultats alimente l'hypothèse selon laquelle les contraintes vibratoires du ski alpin favorisent une diminution de l'implication de la filière aérobie concomitante d'une augmentation de l'implication de la filière anaérobie lactique.

2.6.4.3 - Échauffement cardio-respiratoire.

Un échauffement actif est une routine pour les sportifs en quête de performance. Cette pratique revêt en effet des intérêts au regard de la performance et de la prévention des blessures. La structure d'un échauffement dépend de la tâche à accomplir, des caractéristiques de l'athlète, des conditions environnementales et des contraintes liées à l'organisation spatio-temporelle de la pratique sportive à suivre (Bishop 2003b). Le ski alpin est particulièrement influencé par ce dernier point. Les caractéristiques spatio-temporelles des compétitions du point de vue des heures de reconnaissance, de la distance entre le lieu du tracé d'échauffement et le départ de la course, de la place disponible et des conditions plus ou moins glissantes, raides et restreintes de l'aire de départ de la course sont autant de contraintes pour conduire un échauffement de qualité

avant une épreuve réalisée sur une piste de ski (Sporer et al. 2012). Sporer et al. (2012) montrent lors d'une Coupe du Monde de snowboard (dont l'organisation spatio-temporelle de la compétition est proche du ski alpin), que FC_{moy} des athlètes sur 10min, enregistrées pendant l'heure précédent le départ, n'excède pas 120bpm. Ce résultat suggère un manque d'échauffement aérobie de basse intensité sur une durée suffisamment longue. Sporer et al. (2012) montrent également une durée excessive de plus d'une heure entre la fin de l'échauffement et le départ de la compétition, ainsi qu'un manque de consistance et de structuration du protocole, notamment de la durée et l'intensité de l'échauffement général. Aussi, une partie des démarches d'échauffement utilisées par les athlètes et les coachs reposent davantage sur l'expérience pratique et la tradition plutôt que sur des preuves scientifiques (Bishop 2003b). Dès lors, un échauffement inapproprié peut à contrario diminuer la performance subséquente (Tomaras et MacIntosh 2011). En effet, les bénéfices de l'échauffement seraient liés à une augmentation de la température musculaire, de la viscosité articulaire, de la vitesse de conduction nerveuse et également à des prédispositions psychologiques. Au niveau énergétique, l'échauffement accélère la cinétique de $\dot{V}O_2$ (Bishop 2003a). En effet, différents travaux (Gollnick et al. 1973 ; Gutin et al. 1976 ; Ingjer et Stromme 1979 ; Gerbino et al. 1996 ; Stewart et Sleivert 1998 ; McCutcheon et al. 1999 ; Bishop 2003a ; Jones et Poole 2005 ; Ingham et al. 2013) montrent qu'un échauffement intensif peut accélérer la cinétique de $\dot{V}O_2$ au cours de l'exercice subséquent, si cet exercice a lieu 6min post échauffement. Ainsi, l'amplitude de la seconde phase de la cinétique de $\dot{V}O_2$ est augmentée, avec une réduction de l'amplitude de la composante lente (Burnley et al. 2000, 2002, 2011). Par exemple, au cours d'un T_{lim} réalisé sur un rameur à $\dot{V}O_{2max}$, Sousa et al. (2014) montrent qu'un échauffement modéré et intense (2min à 20% de $\dot{V}O_{2max}$ suivi de respectivement 6min à 67% de $\dot{V}O_{2max}$ et 6min à 87% de $\dot{V}O_{2max}$ puis de 7min de repos) accélère significativement la cinétique de $\dot{V}O_2$ par rapport à un échauffement non réalisé. Ces auteurs n'observent toutefois pas de différence significative entre les échauffements modérés et intenses. Au-delà de l'amélioration de la cinétique de $\dot{V}O_2$, Jones et al. (2003) ont montré une amélioration de T_{lim} à 100%, 110% et 120% de $\dot{V}O_{2max}$ lorsqu'un exercice intense était réalisé au préalable de ces T_{lim}. Toutefois, certaines études (Bruyn-Prevost et Lefebvre 1980 ; Genovely et Stamford 1982 ; Massey et al. 1961 ; Matthews et Snyder 1959) ne montrent pas d'accélération de la cinétique de $\dot{V}O_2$ après un échauffement actif, caractérisé par une intensité d'échauffement trop faible (environ 40% de $\dot{V}O_{2max}$), et/ou une durée trop importante de récupération post échauffement. Un intervalle de plus de 5min mais de moins de 15-20min entre la fin de l'échauffement et le départ de la course est conseillé pour optimiser les performances dans des

disciplines de courtes durées (Bishop 2003b). En somme, les bénéfices de l'échauffement sur la cinétique de $\dot{V}O_2$ nécessitent un échauffement suffisamment intense couplé à un temps de récupération post échauffement pas trop important (Bailey et al. 2009).

De plus, certains auteurs (Robergs et al. 1990 ; Wittekind et al. 2012) ont montré que l'échauffement permet de limiter de manière significative [La] post-effort et ce même si [La] pré-exercice (post-échauffement) est significativement plus élevée dans les conditions d'échauffement intense par rapport à des intensités élevées et faibles, respectivement 4,2 ± 0,9mmol.L^{-1}, 2,0 ± 0,3mmol.L^{-1} et 1,2 ± 0,3mmol.L^{-1}. Toutefois, lorsque l'intensité de l'échauffement est très élevée, [La] post-effort peut être plus élevée par rapport à une intensité d'échauffement modérée (Bishop et al. 2001a ; Sousa et al. 2014). Ainsi, une intensité d'échauffement trop importante provoque une accumulation exagérée de métabolites diminuant le pH musculaire et sanguin (Jones et al. 2003, 2008a,b,c ; Bailey et al. 2009) et *in fine* l'efficacité de la contraction musculaire. Certaines études préconisent une augmentation modérée de [La] pré-effort, i.e., aux alentours de 2,5mmol.L^{-1} (Jones et al. 2003 ; Bishop et al. 2003c ; Koppo et Bouckaert 2002). Ces préconisations permettent de limiter la contribution de la filière anaérobie lactique à la production d'énergie et donc de limiter l'acidose musculaire à l'origine de la fatigue périphérique (Gerbino et al. 1996 ; Krustrup et al. 2001 ; Robergs et al. 1990). Ainsi, un échauffement de qualité diminue de manière significative la sollicitation de la filière anaérobie lactique (Figure 1.28). Cette diminution est compensée par une augmentation significative de $\dot{V}O_2$ permettant une épargne de la filière anaérobie lactique. L'utilisation maximale ultérieure de la filière anaérobie lactique permettrait une augmentation du débit énergétique à un instant t.

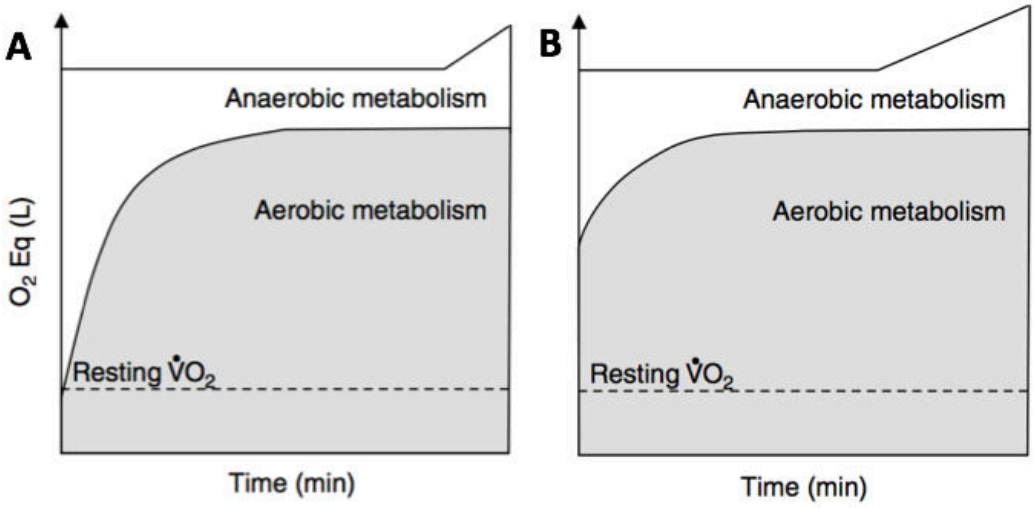


Figure 1.28 - Schématisation de l'implication des métabolismes anaérobie et aérobie sans (**A**) et avec (**B**) échauffement préalable (Bishop 2003a)

O_2 Eq : équivalent en oxygène ; $\dot{V}O_2$: consommation d'oxygène.

2.6.4.4 - Niveau d'hydratation

Un sportif peut se déshydrater de différentes manières : par voie cutanée, par voie orale et par élimination urinaire et fécale. Les contraintes environnementales du ski alpin favorisent la déshydratation. Il existe, en effet, une augmentation de la perte hydrique due à la respiration en altitude à cause de l'air sec et à cause d'une augmentation de la ventilation due aux caractéristiques hypoxiques du milieu (Cherniakov et Maksimov 1967 ; Boyer et Blume 1984). Ainsi, Meyer et al. (2000) montrent que seulement 40% des skieurs de haut niveau boivent plus d'un litre d'eau pendant une séance d'entraînement en ski alpin d'une durée de 4h. Ces apports hydriques faibles seraient en lien avec l'inhibition de la satiété dans l'environnement froid du ski alpin. Au cours de 2h de SL, boire 2,0mL.kg^{-1} après chaque piste, soit 1,2L d'eau par entraînement, permet pourtant de ne pas se déshydrater alors que des skieurs ne buvant pas perdent 0,6 ± 0,2kg avec une diminution concomitante du volume plasmatique de 1,8 ± 0,8% (Seifert et al. 2001). Une étude de la même équipe montre que la déshydratation subséquente à une matinée de ski sans boire n'est pas entièrement compensée (seulement 71%) entre 12h et 14h même si de l'eau est disponible à volonté (Seifert et al. 2005). La déshydratation peut cependant réduire la performance en limitant l'efficacité de la filière aérobie. La déshydratation augmente, en effet, la part de globules rouges par rapport au plasma ce qui augmente la viscosité du sang (Seifert et al. 2001). Le cœur a davantage de travail pour mettre en mouvement le sang, le débit sanguin diminue et la perfusion musculaire en O_2 diminue également (Dill et Costill 1974 ; Gonzalez-Alonso et al. 1998). La réduction de la contribution de la filière aérobie à la production d'énergie provoquerait ainsi une augmentation de la contribution de la filière anaérobie lactique à cette même production d'énergie.

2.6.4.5 - Stocks glucidiques

En raison des systèmes de rétroaction dans le muscle et des besoins de contraction au cours d'une manche de ski alpin, le glycogène musculaire devient le substrat prédominant. Une diminution des stocks de glycogène diminue par conséquent la capacité à répéter des contractions de fortes intensités (Jacobs et al. 1981). Or, ces formes de contractions sont typiques du ski alpin (Hintermeister et al. 2000). A l'aide de biopsies musculaires, Tesch et al. (1978) et Karlsson et al. (1978) ont étudié l'épuisement du glycogène musculaire chez des

skieurs. Chez un groupe de skieurs compétiteurs, le niveau de glycogène musculaire chutait de 34mmol.kg^{-1} de muscle frais après un entraînement en GS, soit 50% des stocks de glycogène (Tesch et al. 1978). Parallèlement, la reconstitution des stocks de glycogène était estimée à 29mmol.kg^{-1} de muscle frais par jour (Karlsson et al. 1978). En raison du bilan négatif (34 vs 29mmol.kg^{-1} de muscle frais), il est très important de reconstituer ses réserves de glycogène quotidiennement via une alimentation adaptée. En effet, Bacharach et Bacharach (2009) montrent que l'augmentation, pendant 2 semaines, de l'apport calorique journalier de 4-500Kcal lors des stages de ski sur glacier permet de limiter le déclin de l'endurance de force. Tesch et al. (1978) et Steadman et al. (1987) ont étudié la cinétique de déplétion du glycogène musculaire chez des skieurs. Ces auteurs ont montré une plus grande utilisation des fibres lentes chez les skieurs élites, par rapport aux skieurs loisirs, ce qui permet de réduire la fatigue endurée par les fibres rapides plus fatigables. Nygaard et al. (1978) montrent que la déplétion des stocks en glycogène est proportionnelle au niveau des skieurs. La supplémentation des apports glucidiques serait ainsi d'autant plus importante pour les skieurs de haut niveau. De plus, Kuno et al. (1994), Haman et al. (2002) et Seifert et al. (2005) ont montré que l'addition du froid, qui provoque une augmentation du métabolisme de base, et de l'environnement hypoxique (aux alentours de 1500-2000m d'altitude), qui augmente l'implication de la filière glycolytique, provoque une déplétion plus rapide des stocks de glycogène par rapport à un environnement plus tempéré et au niveau de la mer. La supplémentation des apports glucidiques semble de mise puisque les skieurs de haut niveau ne consomment pas assez de glucides (52 ± 4% de la ration alimentaire quotidienne, soit 6,4 ± 1,8g.kg^{-1} pour des recommandations de 4,0 à 9,3g.kg^{-1}) lors des phases d'entraînement intense pour refaire les stocks de glycogène (Meyer et al. 2000). Ainsi, les caractéristiques environnementales, musculaires et énergétiques du ski alpin de haut niveau favorisent la déplétion des stocks de glycogène du skieur. Ce phénomène semble pouvoir influencer une séance d'entraînement longue et surtout l'enchaînement de séances et de compétitions.

2.6.5 - Part d'implication des filières énergétiques

Il est fondamental de garder à l'esprit la participation concomitante des filières énergétiques à la production d'énergie. Lorsqu'une filière est majoritairement impliquée dans le débit énergétique, les deux autres filières y participent également dans une moindre mesure (Howald et al. 1978). Par exemple, le métabolisme anaérobie lactique contribue à la production d'énergie après quelques secondes d'effort d'intensité maximale (Gaitanos et al. 1993). Selon

la même logique, la filière aérobie contribue significativement à la production d'énergie lors d'un effort d'intensité maximale après 30s d'effort (Nevill et al. 1996 ; Medbo et al. 1989 ; Withers et al. 1991) en atteignant 90% de VO_{2max} (Smith et al. 1991). La prépondérance de l'utilisation de ces filières énergétiques dépend ainsi du temps d'effort mais également de son intensité (Howald et al. 1978). Breil et al. (2010) suggèrent que pendant un exercice de haute intensité et de durée limitée, tel que le ski alpin, les aptitudes aérobies sont discriminantes au regard de la performance. Toutefois, l'implication des différentes filières énergétiques dans le débit énergétique du skieur alpin fait débat dans la littérature scientifique. Par exemple, beaucoup d'auteurs ont décrit l'influence des capacités aérobies en ski alpin de compétition mais il persiste un désaccord sur son importance (Karlsson 1984 ; Karlsson et al. 1978 ; Song 1982 ; Steadman et al. 1987 ; Andersen et al. 1988 ; White et al. 1993 ; Bosco et al. 1994 ; Tesch 1995 ; Turnbull et al. 2009 ; Von Duvillard et al. 2000 ; Bacharach et Von Duvillard 1995 ; Nilsson et al. 2018). Autrement dit, il n'y a pas de consensus sur les métabolismes (aérobie, anaérobie lactique et anaérobie alactique) à solliciter prioritairement dans le cadre d'une préparation physique. Malgré l'absence d'études similaires sur les autres épreuves (SG et DH), Bacharach et Von Duvillard (1995) émettent l'hypothèse que les épreuves techniques (SL et GS) – plus courtes – solliciteraient davantage le métabolisme anaérobie que les épreuves de vitesse – plus longues – qui solliciteraient davantage le métabolisme aérobie (Eriksson et al. 1977 ; Tesch et al. 1978 ; Bosco et al. 1994 ; Tesch 1995 ; Bacharach et Von Duvillard 1995). Par ailleurs, les travaux de Tesch (1978) suggèrent une implication plus prononcée du métabolisme aérobie chez les skieurs expérimentés par rapport aux non expérimentés.

2.6.5.1 - Travaux de laboratoire en ski alpin

La majorité des études sur la contribution des différentes filières énergétiques à la production d'énergie en ski alpin sont des études réalisées en laboratoire. Elles se cantonnent à établir des corrélations entre le niveau de performance des skieurs et les caractéristiques physiologiques mesurées en conditions de laboratoire. Certaines études montrent une corrélation entre la performance en ski alpin et le fait d'avoir une $\dot{V}O_{2max}$ élevée (Neumayr et al. 2003 ; Zitoun-Florentin 2011 ; Vogt et Hoppeler 2012). Toutefois, selon Tesch (1995), la $\dot{V}O_{2max}$ considérée seule ne serait pas vraiment déterminante de la performance en ski alpin de compétition. Enfin, White et al. (1991), Impellizzeri et al. (2009) et Nilsson et al. (2018) ne montrent pas de corrélation entre la performance en ski alpin et $\dot{V}O_{2max}$. Toutefois, une corrélation entre deux paramètres ne permet d'établir un lien de causalité entre eux. En effet, la

corrélation peut s'expliquer par des facteurs génétiques, par l'entraînement plus ou moins spécifique suivi lors de la préparation physique, par les contraintes intrinsèques des entraînements de ski alpin etc. Il est effectivement difficile de discriminer avec précision la part des adaptations physiologiques liées à l'activité spécifique et celle liée à la préparation physique. Cette interrogation est d'autant plus légitime que les skieurs passent finalement assez peu de temps sur les skis alors que la préparation physique hors ski représente une grande part de leur activité physique annuelle. Dès lors, les facteurs génétiques et l'entraînement physique pourraient façonner les caractéristiques physiologiques des skieurs de haut niveau. Or, il n'est pas certain que ces caractéristiques physiologiques soient spécifiques du ski alpin *in situ*. Ainsi, si des tests d'effort décèlent certaines qualités chez des skieurs du top niveau mondial, il pourrait être tentant de conclure que dans la mesure où les meilleurs skieurs au monde présentent ces qualités, ce sont elles qui seraient représentatives des contraintes du ski alpin. Dès lors, ces conclusions peut-être hâtives pourraient alimenter des choix d'objectifs en termes de préparation physique. Ces objectifs pourraient être erronés en étant potentiellement déconnectés de la réalité des contraintes physiologiques du ski alpin. Cette déconnexion est d'autant plus plausible que les différentes ressources (physiques, mentales etc) sollicitées lors d'une épreuve compétitive de ski alpin sont très complexes à appréhender. En effet, le ski alpin est une activité dont les facteurs de performance sont plurifactoriels (Bacharach et Von Duvillard 1995 ; Tesch et al. 1978 ; Veicsteinas et al. 1984 ; Saibene et al. 1985 ; White et al. 1991 ; White et Johnson 1993 ; Tesch et al. 1995 ; Haman et al. 2002 ; Coulmy 2014).

2.6.5.2 - Bénéfices des qualités de puissance aérobie au-delà d'une manche isolée de ski alpin

Comme évoqué dans la partie 2.6.4., les qualités aérobies d'un skieur de haut niveau permettraient de limiter la contribution de la filière anaérobie lactique à la production d'énergie (Howald et al. 1978). Ce mécanisme souligne l'intérêt de posséder des qualités aérobies importantes au niveau d'une manche de ski alpin isolée. Toutefois, les contraintes inhérentes aux entraînements et aux compétitions sont plus larges que celles d'une manche isolée. Aussi, des qualités aérobies importantes - reflétées par une $\dot{V}O_{2max}$ élevée - présentent à différents égards des intérêts certains pour le skieur de haut niveau :

- Pour récupérer rapidement et suffisamment entre les manches (Neumayr et al. 2003). Ceci est d'autant plus vrai depuis l'installation d'un nouveau schéma de compétition olympique en SP qui implique jusqu'à 10 manches avec des récupérations très courtes (entre 5 et 15min) entre chaque manche.

- Pour récupérer rapidement et suffisamment entre les compétitions (Neumayr et al. 2003). Ceci est d'autant plus vrai pour les skieurs polyvalents susceptibles de participer à une trentaine de départs de Coupe du Monde par saison.
- Pour encaisser la charge d'entraînement pendant la longue période d'entraînement (Neumayr et al. 2003).
- Pour garder un niveau de performance élevé pendant l'intégralité de la saison compétitive. Ceci est d'autant plus vrai que les compétitions majeures que sont les JO et les Championnats du Monde, ont toujours lieu dans la seconde partie de saison (Neumayr et al. 2003).
- Pour encaisser une charge d'entraînement élevée dans un environnement hypoxique (ski sur glacier, principalement l'été et l'automne).
- Pour performer lors des compétitions ayant lieu en haute altitude (Coupes du Monde de Sölden et Beaver Creek).
- Pour limiter le risque de blessures comme cela a été démontré chez les footballeurs (Gastin et al. 2015), les rugbymans (Gabbett et Domrow 2005) et les spécialistes de sports de combat (Knapik et al. 2001).

2.6.5.3 - Méthodes de calcul in situ

2.6.5.3.1 - Débit énergétique

Le débit énergétique, correspond à la quantité d'énergie dépensée par unité de temps. Chez des skieurs évoluant en Coupe du Monde, le débit énergétique total en SL (7,87 ± 1,16L.min^{-1}) est équivalent au double de celui de $\dot{V}O_{2max}$. En GS (6,40 ± 0,78L.min^{-1}) il équivaut à 1,6 fois celui de $\dot{V}O_{2max}$ (Veicsteinas et al. 1984). Ainsi, le débit énergétique (kJ.min^{-1}) serait 23% plus élevé en SL par rapport au GS (Veicsteinas et al. 1984). Cette tendance est toutefois non significative. Cela pourrait s'expliquer par le faible échantillon de l'étude (n = 8). Chez les skieurs de l'équipe nationale militaire italienne, le débit énergétique total en GS (72mLO_2. min^{-1}.kg^{-1}) correspond à 1,2 fois celui de $\dot{V}O_{2max}$ (Saibene et al. 1985). De plus, le débit énergétique est 1,3 fois plus élevé chez les skieurs élites (6,40 ± 0,78L.min^{-1}) par rapport à des moniteurs de ski (4,72 ± 1,01L.min^{-1}) (Veicsteinas et al. 1984). Ainsi, le débit énergétique dépendrait du niveau des skieurs. Plus les skieurs sont performants et plus leur débit énergétique serait élevé. En ski libre, le débit énergétique peut être augmenté en réalisant des petits virages, en ne faisant pas de pause au milieu des pistes et en réalisant des virages coupés plutôt que dérapés (Stoggl et al. 2016). Le débit énergétique total d'une session de ski alpin est

relativement faible par rapport à d'autres activités sportives. A titre d'exemple, le débit énergétique d'une heure de ski de fond correspond à 2h30 de ski alpin si le temps effectif de ski est de 44% (Stoggl et al. 2016). Pour calculer la contribution relative des différentes filières énergétiques, il s'agit, à partir de la dépense énergétique totale, de définir le pourcentage d'énergie fournie par chaque filière. Différentes méthodes valides existent pour calculer la dépense énergétique de chaque filière (Tableau 1.5). Toutefois, certaines méthodes ne sont pas applicables pour toutes les motricités et pour toutes les durées d'effort.

Métabolisme	Nom de la méthode	Avantages	Limites
Anaérobie alactique	**Biopsie musculaire**	- Mesure directe - Mesure précise	- Invasif - Interdit en contexte expérimental
	EPOC (Margaria et al. 1933, 1963)	- Très adapté pour une activité régulière	- Estimation indirecte - Nécessite 10min de mesure post-effort - S'applique aux activités à intensité régulière - Surestimerait l'implication du métabolisme anaérobie alactique
	Équivalent énergétique des stocks de PCr (Zamparo et al. 2011)	- Facilité de mise en œuvre	- Estimation indirecte - Postulat stock PCr complet - Postulat déplétion PCr complète
Anaérobie lactique	**Déficit d'O_2** (Medbo 1988)	- Mesure précise si mesures préalables établies individuellement	- Estimation indirecte - Calcul dépendant de l'économie du geste - S'applique aux activités à intensité régulière
	EPOC (Hill et Lupton 1923 ; Margaria et al. 1963)	- Très adapté pour une activité régulière	- Estimation indirecte - Nécessite 60min de mesure post-effort - S'applique aux activités à intensité régulière - Surestimerait l'implication du métabolisme anaérobie alactique
	Concentration sanguine en acide lactique (Bertuzzi et al. 2016)	- Facilité de mise en œuvre	- Estimation indirecte - Turnover de l'acide lactique élevé - Différence de concentration en acide lactique entre les milieux musculaire et sanguin - Invasif
Aérobie	**Equivalent énergétique de l'O_2** (Bertuzzi et al. 2016; Osgnach et di Prampero 2018)	- Estimation précise	- Estimation indirecte - Postulat du substrat carbohydrate majoritaire

Tableau 1.5 - Méthodes d'estimation de la contribution des systèmes énergétiques à la production d'énergie

O_2 : oxygène ; PCr : Phosphocréatine ; EPOC : consommation d'oxygène post-exercice.

2.6.5.3.2 - Métabolisme aérobie

La quantité d'énergie nette provenant du métabolisme aérobie ($E_{aéro}$, exprimée en kJ) correspond à l'énergie libérée par les substrats que consomme le métabolisme aérobie durant l'exercice. $E_{aéro}$ s'obtient alors en multipliant le volume d'O_2 net consommé (exprimé en L d'O_2) par un équivalent énergétique de l'O_2 estimé à 20,9 $kJ.L^{-1}$ d'O_2 lorsque le substrat énergétique est mixte (d'origine glucidique et lipidique) ou 21,3 $kJ.L^{-1}$ d'O_2 lorsque l'intensité d'exercic est supramaximale et que le substrat énergétique est exclusivement d'origine glucidique (Di Prampero 2003 ; Zamparo et al. 2011 ; Bertuzzi et al. 2016). Le volume d'O_2 net consommé est mesuré via l'aire sous la courbe d'O_2, par exemple avec le logiciel dédié proposé par Bertuzzi et al. (2016). La contribution du métabolisme aérobie à la fourniture d'énergie lors de l'exercice correspond alors au rapport entre $E_{aéro}$ et la quantité totale d'énergie (E_{tot}) dépensée au cours de l'exercice. Une méthode complémentaire consiste à ajouter à l'équivalent énergétique de la $\dot{V}O_2$ les réserves en O_2 présentes dans l'organisme au début de l'effort. Elles sont estimées à 2,3 mL d'$O_2.kg^{-1}$ de poids de corps (Hill et al. 1999). Ces modèles sont applicables relativement aisément avec le matériel d'investigation contemporain. En effet, l'utilisation d'analyseur de gaz portable élude les problèmes de limitation de la motricité et d'aérodynamisme que pose la méthode des sacs de Douglas chez le skieur alpin (Veicsteinas et al. 1984 ; Saibene et al. 1985).

2.6.5.3.3 - Métabolisme anaérobie lactique

Il existe 3 méthodes d'estimation de la contribution du métabolisme anaérobie lactique à la production d'énergie. Ces méthodes se font soit à partir de la mesure du déficit d'O_2, soit à partir de l'EPOC ou soit à partir de la production d'acide lactique (Karlsson 1971 ; Bangsbo et al. 1990).

Medbo (1988) propose d'estimer la contribution du métabolisme anaérobie lactique à la production d'énergie à partir du déficit d'O_2. Cette méthode est basée – pour des intensités supramaximales - sur l'extrapolation de la relation linéaire entre $\dot{V}O_2$ et la vitesse du tapis de course. Toutefois, la pente de la relation entre la vitesse de déplacement et $\dot{V}O_2$ varie de 16% entre les individus car elle dépend de l'économie du geste, i.e., la capacité à réaliser un geste en dépensant le moins d'énergie métabolique possible. C'est pourquoi la relation doit être établie de manière individuelle et pour chaque motricité. Certaines études n'ayant pas établies de relation individuelle entre $\dot{V}O_2$ et la vitesse de déplacement (Inbar et al. 1976 ; Karlsson et al. 1970) surestiment la contribution du système anaérobie lactique (Gastin 1994 ; Medbo et al.

1988). De plus, l'utilisation de la méthode du déficit d'O_2 dans les activités physiques très intenses est questionnable au regard de l'incertitude quant à la stabilité de l'économie du geste lors de ce type d'effort (Saltin et al. 1989).

L'estimation de la contribution du métabolisme anaérobie lactique à la production d'énergie peut également être réalisée grâce à la méthode de l'EPOC initialement appelée méthode de la dette d'O_2 (Hill et Lupton 1923 ; Margaria et al. 1963). Cette méthode utilise la pente de la composante lente de la courbe de $\dot{V}O_2$ pendant la phase de récupération post-effort (Beneke et al. 2007). En effet, après l'arrêt de l'effort, $\dot{V}O_2$ diminue dans un premier temps de manière rapide (composante rapide de l'EPOC) puis de manière plus douce (composante lente de l'EPOC) avant d'atteindre un niveau basal. La composante lente correspond à l'oxydation des métabolites issues de la filière anaérobie lactique. La quantité d'O_2 consacrée à la transformation des métabolites permet d'estimer la quantité de métabolites et in fine le débit énergétique de la filière anaérobie lactique durant l'effort qui précède. La méthode de l'EPOC, pourtant très utilisée, surestimerait l'implication de la filière anaérobie lactique (Hermansen 1969 ; Vandewalle et al 1987 ; Saltin 1990 ; Bangsbo et al. 1990 ; Duffield et al. 2004). Les facteurs connus pour élever la $\dot{V}O_2$ durant la phase de récupération, indépendamment du métabolisme anaérobie, sont une température élevée, l'augmentation de l'activité hormonale impliquant une augmentation de la dépense énergétique associée au retour de l'homéostasie (Vandewalle et al. 1987 ; Gaesser et al. 1984). De plus, la synthèse des protéines due au remodelage musculaire post exercice est également coûteuse en énergie sur l'échelle temporelle de la composante lente de l'EPOC (Gaesser et al. 1984).

Enfin, l'estimation de la contribution du métabolisme anaérobie lactique (E_{lact}, exprimé en J) à la production d'énergie peut être estimée à l'aide de l'équivalent énergétique : $1mmol.L^{-1}\Delta[La]$ correspondant à $3mLO_2.kg^{-1}$ de poids de corps (Bertuzzi et al. 2016). Il s'agit de soustraire à $[La]_{pic}$ post effort la [La] de repos afin d'obtenir $\Delta[La]$. Cette méthode est invasive mais peu contraignante au niveau expérimental.

Avec cette méthode, le lactate sanguin n'est supposé représenter l'activité glycolytique musculaire qu'à la condition que la clairance du lactate sanguin (assurée par d'autres organes que les muscles actifs) soit minimale au cours de l'effort. Ceci ne semble vérifié (i) que si l'épreuve est supramaximale et de courte durée (quelques minutes au maximum) et (ii) que si l'effort débute alors que l'activité métabolique est au repos. La contribution du métabolisme anaérobie lactique (%AnL) sur l'exercice, correspond au rapport entre E_{lact} et la quantité E_{tot} dépensées au cours de l'exercice. Au regard de la cinétique de [La], une mesure de [La] 3min après l'effort est généralement utilisée pour estimer $[La]_{pic}$. Toutefois, il existe une variabilité

interindividuelle de la cinétique de [La] (Bret et al. 2003) amenant certains auteurs (Bangsbo et al. 1993 ; Gastin 2001) à critiquer cette méthode pour estimer la contribution du métabolisme anaérobie lactique à la production d'énergie. Brooks et al. (1991) soulignent le fait que l'espace de dilution de l'acide lactique n'est pas défini et que le turnover de l'acide lactique est élevé. Ces auteurs critiquent également le fait qu'il est difficile d'appréhender la part de la masse musculaire impliquée dans l'exercice et la quantité d'acide lactique produite par le muscle et que l'on ne retrouve pas dans le milieu sanguin.

2.6.5.3.4 - Métabolisme anaérobie alactique

Il existe trois méthodes pour estimer la contribution du métabolisme anaérobie alactique (E_{alac}) à la production d'énergie. Une première méthode mesure de manière directe la quantité d'énergie fournie par la voie des Phosphagènes en mesurant la déplétion des réserves musculaires de phosphorylcréatine (PCr). Cette information étant impossible à obtenir de manière non-invasive, elle nécessite de réaliser une biopsie musculaire avant et après l'effort. En France, le cadre éthique de la recherche en physiologie de l'effort ne permet pas de réaliser ce type de mesure invasive. Une seconde méthode appelée méthode de la dette d'O_2 (EPOC) estime de manière indirecte la contribution de la voie des Phosphagènes via la composante rapide de l'EPOC (Margaria et al. 1933 ; Margaria et al. 1963 ; Beneke et al. 2007). C'est à dire, la diminution rapide de l'aire sous la courbe d'O_2 après l'arrêt de l'effort. Cette méthode nécessite un temps de mesure des échanges gazeux de 10min après l'arrêt de l'effort afin de déterminer l'amplitude et la durée de la composante rapide de la courbe d'O_2 à l'aide du logiciel proposé par Bertuzzi et al. (2016). Toutefois, cette méthode d'estimation de la contribution du métabolisme anaérobie alactique à la production d'énergie est critiquée par différents auteurs (Hermansen et al. 1969 ; Vandewalle et al. 1987 ; Saltin et al. 1990). Selon Bangsbo et al. (1990), la méthode de l'EPOC surestime l'implication des métabolismes anaérobies. Selon ces auteurs, l'EPOC inclut la resynthèse des nucléotides et de la PCr et l'élimination des lactates durant les 60 premières minutes de récupération. Si ce modèle est valide (Gastin 1994 ; Medbo et al. 1988, 1996) et est le plus utilisé pour des activités de cyclisme et de course à pied, Bangsbo et al. (1990) insistent sur le fait qu'il ne s'applique pas à tous les types d'effort. En effet, cette méthode n'est applicable qu'aux activités physiques continues, régulières et d'intensité maximale (Di Prampero 2003 ; Zamparo et al. 2011). Au regard de ses propres caractéristiques, le ski alpin ne semble pas pouvoir être considéré comme un exercice d'intensité maximale (plafonnement de $\dot{V}O_2$ entre 79 et 93% de $\dot{V}O_{2max}$ en GS (Tesch et al. 1978 ; Saibene et al. 1985 ; Rognmo et al. 2002)), régulier (tracés tout à fait irréguliers) et continu (repos relatif sur

certaines portions de tracé dont la pente et l'écart horizontal entre les portes diminuent). Cette méthode ne semble donc pas appropriée à cette discipline sportive. Il apparaît également que la dissociation entre la $\dot{V}O_2$ de récupération et le devenir des lactates diminue sensiblement la pertinence de cette méthode avec l'influence d'autres facteurs stimulant la respiration mitochondriale post exercice (Gaesser et al. 1984 ; Rieu et al. 1988). Les facteurs connus pour élever la $\dot{V}O_2$ durant la phase de récupération, indépendamment du métabolisme anaérobie, sont une température élevée, l'augmentation de l'activité hormonale impliquant une augmentation de la dépense énergétique associée au retour de l'homéostasie (Vandewalle et al. 1987 ; Gaesser et al. 1984). Enfin, cette méthode de l'EPOC est basée sur des postulats et revêt les limites présentées ci-dessus (Gastin et al. 1994 ; Bangsbo et al. 1994). Toutefois, comme cette méthode est la plus populaire pour estimer la contribution du métabolisme anaérobie alactique à la production d'énergie, elle a l'avantage de permettre des comparaisons avec les études antérieures. Une troisième méthode fait le postulat que les stocks de PCr sont pleins au début de l'effort et vont être entièrement utilisés au cours de l'effort. Zamparo et al. (2011) proposent d'estimer le débit énergétique du système anaérobie alactique en appliquant un équivalent énergétique de 416 $J.kg^{-1}$ de poids de corps.

2.6.5.4 - Travaux in situ dans d'autres disciplines que le ski alpin

Howald et al. (1978) présentent une schématisation des relations entre les différents métabolismes impliqués dans le fonctionnement musculaire humain (Figure 1.29).

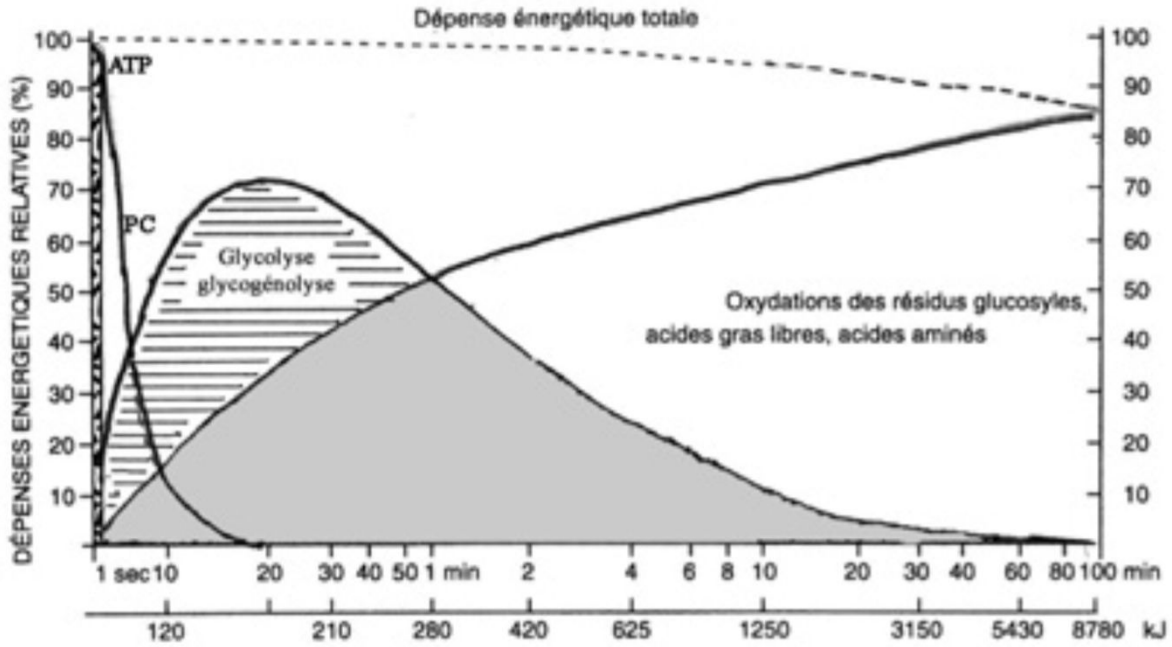


Figure 1.29 - Part de contribution des différents systèmes métaboliques (D'après Poortmans 1988 in Poortmans et Boisseau 2017)

L'interprétation de ce concept a malheureusement souvent provoqué de la confusion dans certains esprits. Par exemple, chaque métabolisme énergétique serait impliqué seul dans la contribution à la production d'énergie et uniquement pour une période de temps d'effort maximal donnée (Gastin 2001). Une des conséquences de cette relative confusion est qu'il est souvent considéré que la filière aérobie joue un rôle mineur dans la performance lors d'efforts de courte durée (Gastin 2001). A titre d'exemple, lors d'un tour de table, 35 à 65% d'entraîneurs experts du 800m en athlétisme sous-estimaient la contribution de la filière aérobie à la production d'énergie dans leur spécialité (New Studies in Athletics Round Table 1996). Ces sous-estimations sont typiques et reflètent les idées reçues qui caractérisent les pensées en matière énergétique, même chez des professionnels reconnus. Astrand et Rodahl (1970) montrent l'implication complémentaire et évolutive des filières énergétiques sur un temps d'effort allant de 10 à 120s. Ces auteurs avancent le fait qu'une contribution du métabolisme aérobie de 50% de la production totale d'énergie nécessite un effort maximal de 120s. Mathews et Fox (1971) montrent que ce point d'égale contribution n'intervient pas pour des efforts de moins de 3-4 min. Selon Gastin (2001), ce point d'égalité dans la production énergétique des différents métabolismes a été largement surestimé. Selon ces auteurs il serait davantage localisé aux alentours de 75s (Figure 1.30). En effet, dès 20-30s, la filière aérobie fournit davantage d'énergie que les filières anaérobies à un instant t (« cross over concept » (Figure 1.31))(Gastin et al. 1994 ; Spencer et al. 1996).

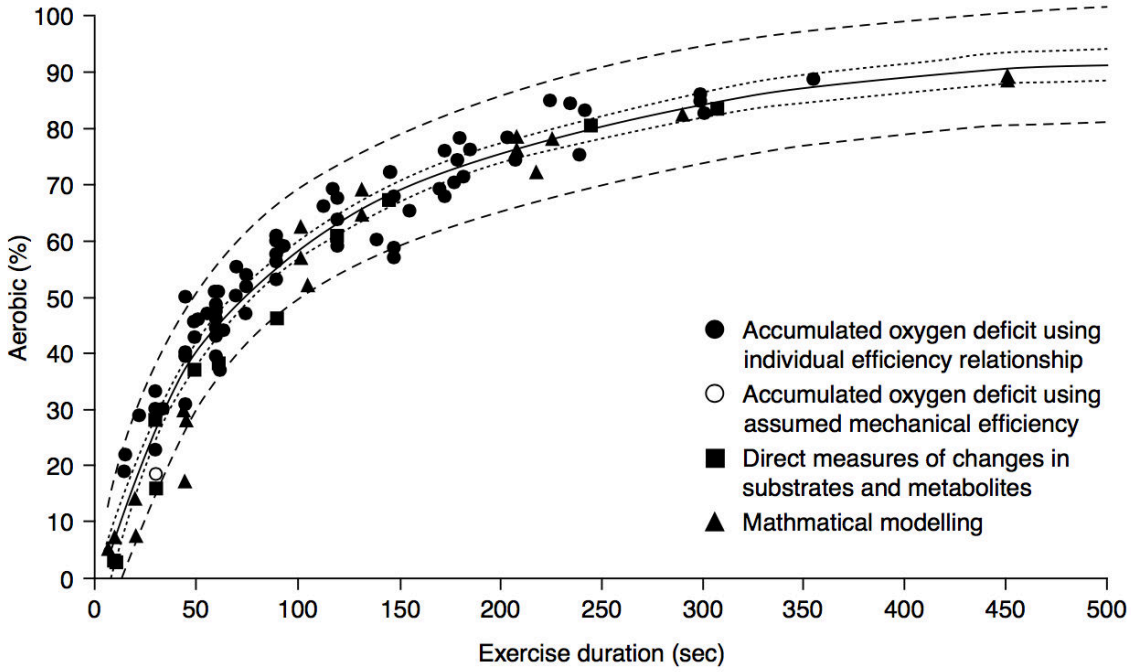


Figure 1.30 - Résumé de la littérature concernant l'implication de la filière aérobie dans le débit énergétique total d'efforts d'intensités maximales et de différentes durées (Gastin 2001)

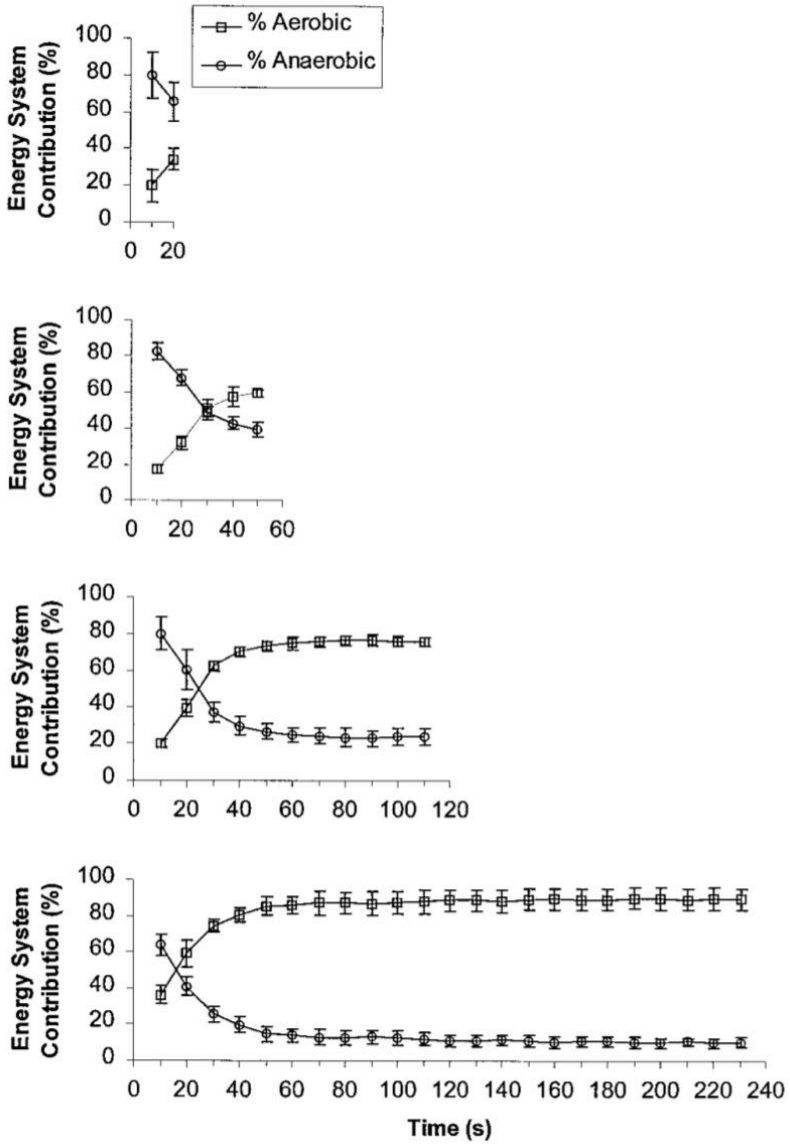


Figure 1.31 - Contribution des systèmes aérobie et anaérobies par tranches de 10s au cours de 200m, 400m, 800m et 1500m (Spencer et Gastin 2001)

Depuis les années 1990, des travaux réalisés sur le cyclisme ou la course à pied ont révisé les estimations proposées par Howald et al. (1978) sur les contributions respectives des différents métabolismes à la production totale d'énergie. Ces travaux montrent que le métabolisme aérobie intervient de manière plus conséquente dans les efforts maximaux, de courte à moyenne durée (20-120s). Selon ces différentes études, la contribution du métabolisme aérobie s'échelonnerait de 27% (Gastin 2001) à 40% (Medbo et Tabata 1988) pour une épreuve maximale de 30s, contre moins de 10%, pour le même type d'effort (Howald 1978). Cette contribution du métabolisme aérobie serait d'environ 80% pour une épreuve maximale de 4min (Medbo et Tabata 1988 ; Gastin 2001) contre moins de 60%, pour le même type d'effort, selon

Howald (1978) (Tableau 1.6).

Durée des exercices maximaux (sec)	% Anaérobie	% Aérobie
10	94	8
15	88	12
20	82	18
30	73	27
45	**63**	**37**
60	**55**	**45**
75	**49**	**51**
90	44	56
120	37	63
180	27	73
240	21	79

Tableau 1.6 - Estimation des contributions énergétiques anaérobie (% anaérobie) et aérobie (% aérobie) dans le débit énergétique total en fonction de la durée d'exercices maximaux réalisés en course à pied ou sur ergocycle (Gastin 2001)

Ces données génériques relatives aux motricités les plus faciles à investiguer (la course à pied et le cyclisme sur ergocycle) peuvent servir d'orientation générale d'entraînement. Toutefois, pour fixer des objectifs d'entraînement plus pertinents, il est nécessaire d'investiguer chaque motricité afin d'attester d'éventuelles différences par rapport aux disciplines faisant référence dans la littérature énergétique. Lors d'un test Wingate de 30s, des auteurs rapportent une estimation de la contribution du métabolisme aérobie à la production d'énergie de l'ordre de 18,5% (Kavanagh et Jacobs 1988) et 16% (Smith et Hill 1991). Contrairement à ces faibles contributions du métabolisme aérobie, 57 autres études rapportent, en utilisant la méthode de l'EPOC, des contributions du métabolisme aérobie s'échelonnant de 23 à 30% lors d'un test Wingate de 30s (Gastin et al. 1994 ; Calbet et al. 1997 ; Hermansen et al. 1984 ; O'Brien et al. 1997 ; Withers et al. 1991 ; Serresse et al. 1988 ; Bogdanis et al. 1996). Medbo et al. (1989, 1999) montrent une contribution plus élevée du métabolisme aérobie à la production totale d'énergie de l'ordre de 38-40%. Au cours d'un 200m en athlétisme, des études montrent une contribution du métabolisme aérobie à la production totale d'énergie de l'ordre de 21 à 29% chez les hommes et de 22 à 33% chez les femmes (Duffield et al. 2004 ; Spencer et Gastien 2001). Au cours d'un 400m en athlétisme, des études montrent une contribution du métabolisme aérobie à la production totale d'énergie de l'ordre de 37 à 43% chez les hommes et de 38 à 45%

chez les femmes (Duffield et al. 2005 ; Hill et al. 1999 ; Zouhal et al. 2010 ; Spencer et Gastien 2001). Ces études réalisées sur piste présentent des résultats qui sont comparables aux résultats des études réalisées sur tapis roulant en laboratoire. En effet, certains auteurs rapportent une contribution du métabolisme aérobie à la production totale d'énergie de l'ordre de 37 à 44% chez des individus entraînés lors d'un effort maximal d'une durée de 49 à 57s (Medbo et al. 1985 ; Nummela et al. 1995). Au cours d'un 800m, les résultats de certaines études montrent une contribution du métabolisme aérobie à la production totale d'énergie de l'ordre de 55 à 66% chez les hommes et de 67 à 70% chez les femmes (Duffield et al. 2005 ; Hill et al. 1999 ; Spencer et Gastien 2001 ; di Prampero et al. 1993 ; Péronnet et Thibault 1989 ; Spencer et al. 1996). Le crossover interviendrait entre 15 et 30s sur des efforts de 400, 800 et 1500m (Spencer et Gastin 2001).

En cyclisme sur piste, Craig et Norton (2001) montrent une contribution du métabolisme aérobie à la production totale d'énergie de l'ordre de 35% et 50% sur des distances respectives de 500m chez les femmes et 1000m chez les hommes dont les records du Monde correspondent respectivement à des temps d'effort de 34s et 60s. En natation, Capelli et al. (1998) montrent, chez des athlètes universitaires, une contribution du métabolisme aérobie à la production totale d'énergie de l'ordre de 15 ± 6% et 33 ± 2% sur des 50m et 100m nage libre nagés respectivement en 23,2s et 53,2s. Ribeiro et al. (2015) montrent une contribution du métabolisme aérobie à la production totale d'énergie de l'ordre de 43% sur un 100m nage libre nagé en 63s par des nageurs de niveau régional. D'autres études en natation laissent entrevoir un rôle important de la stratégie de course (par modulation de la vitesse en cours d'épreuve) sur la dynamique des réponses métaboliques (Bishop et al. 2002 ; Hanon et al. 2010). Ces études ont notamment montré que l'élévation de $\dot{V}O_2$ est d'autant plus rapide que l'intensité adoptée en début d'épreuve est importante. En kayak slalom et en course en ligne, pour une population hétérogène d'individus entraînés à très entraînés, Zamparo et al. (2006) montrent une contribution du métabolisme aérobie à la production totale d'énergie de l'ordre de 50% lors de deux efforts d'une durée respective de 85,8 ± 5,3s et 88,1 ± 7,7s. Au cours d'une course en ligne de kayak de 250m, d'une durée de 62s, la contribution du métabolisme aérobie à la production totale d'énergie est de l'ordre de 41% (Zamparo et al. 1999). En somme, les études précédentes montrent une contribution du métabolisme aérobie à la production totale d'énergie de l'ordre de 40% sur 30s, 50% sur 60s et 65% sur 120s d'exercice maximal (Medbo et al. 1989). Ces résultats montrent que les métabolismes aérobie et anaérobie contribuent tous de manière significative à la fourniture d'énergie lors d'exercices maximaux de 30s à 120s.

Les différences d'implication du métabolisme observées entre les différentes études seraient dues :

- Aux méthodes de calcul utilisées.
- Au niveau des athlètes dont dépend l'économie de course et le temps d'effort (Nummela et Rusko 1995).
- A la motricité.

Ainsi, contrairement aux arguments avancés par certains auteurs (Gastin et al. 1995 ; Medbo et al. 1988 ; Medbo et al. 1989 ; Withers et al. 1991), une revue de littérature de différentes disciplines permet d'observer des différences de contribution du métabolisme aérobie à la production totale d'énergie en fonction des motricités mises en jeu dans les différentes spécialités sportives. C'est pourquoi il est important d'investiguer ces paramètres dans chaque spécialité sportive pour en affiner la connaissance du point de vue physiologique.

2.6.5.5 - Travaux in situ en ski alpin

D'après une étude réalisée à 2850m d'altitude auprès de skieurs évoluant en Coupe du Monde, la contribution du métabolisme aérobie à la production totale d'énergie lors d'un GS d'une durée de 77s serait de 30-35%, celle de la filière anaérobie lactique de 40% et celle de la filière anaérobie alactique de 25-30% (Veicsteinas et al. 1984). Pour Saibene et al. (1985) la contribution des différents métabolismes énergétiques à la production totale d'énergie, au cours d'un GS d'une durée de 81,6 ± 3,08s, réalisé par des skieurs d'une équipe nationale militaire, serait respectivement de 46,4%, 28,3% et 25,4% pour les métabolismes aérobie, anaérobie lactique et anaérobie alactique. Si ces travaux présentent le mérite d'être les premiers à étudier la contribution des différents métabolismes énergétiques à la production totale d'énergie chez le skieur alpin, ils présentent certains biais méthodologiques inévitables au regard des avancées technologiques de l'époque. En effet, ces études *in situ* des années 1980 utilisent des sacs de Douglas comme outils de mesure. S'ils font référence pour des études menées en conditions de laboratoire, l'utilisation de ces sacs dans des conditions écologiques de pratique du ski alpin entraîne inévitablement des gênes pour la mobilité du skieur en plus d'un effet freinateur dû au volume important des sacs qui gonflent au cours de l'exercice (Durnin et Passmore 1967). Les appareils portables de mesure des échanges gazeux qui existent actuellement permettent de se rapprocher davantage de la motricité écologique du skieur. Les résultats recueillis sont alors plus révélateurs des sollicitations physiologiques du ski alpin. De plus, du fait du volume

restreint des sacs de Douglas, les auteurs des précédentes études n'ont pas mesuré la $\dot{V}O_2$ des skieurs pendant toute la durée du GS (Durnin et Passmore 1967). Ils ont notamment dû extrapoler la cinétique de $\dot{V}O_2$ à l'origine de leurs calculs. S'agissant de la contribution du métabolisme anaérobie alactique à la production totale d'énergie, Veicsteinas et al. (1984) et Saibene et al. (1985) l'ont respectivement estimé via la méthode de l'EPOC chez les skieurs de l'équipe nationale italienne (25-30%) et les skieurs de l'équipe nationale militaire (25,4%). Toutefois, la validité de cette méthode a été contestée par les travaux de Bangsbo et al. (1990) qui ont montré que les valeurs obtenues par cette méthode étaient amplement surestimées. De surcroît, cette méthode est adaptée à des conditions de laboratoire et pendant un exercice d'intensité stable et maximale. Cette intensité stable et maximale est impossible à obtenir en ski alpin. L'ensemble des remarques listées précédemment constituent sans aucun doute autant de limites à l'utilisation de ces méthodes et de leurs résultats.

Au-delà des remarques précédentes essentiellement d'ordre méthodologique, l'évolution, depuis les années 1980, du matériel, du règlement, de la préparation des pistes (Neumayr et al. 2003 ; Karlsonn 2005 ; Woerndle 2007 ; Kröll et al. 2010), des contraintes associées, d'ordres mécaniques (Supej et al. 2002 ; Kugovnik et al. 2003 ; Mueller et al. 2004), psychologiques et perceptivo-décisionnelles, éloignent ces études *in situ* de la réalité écologique actuelle du ski alpin de compétition. Par ailleurs, d'autres études plus contemporaines appréhendent la problématique de la contribution des différents métabolismes énergétiques à la production totale d'énergie du skieur alpin. D'après une étude relativement récente menée par le DSS de la FFS (données internes FFS, 2015), lors d'un GS d'une durée de 71,67 ± 1,80s réalisé par des skieurs de haut niveau dans des conditions de compétition, la contribution du métabolisme aérobie à la production totale d'énergie serait prépondérante (63,7 ± 3,99%) par rapport à la filière anaérobie lactique (36,3 ± 3,99%). Ces résultats rejoignent ceux de Burtscher et al. (2000) qui montrent, qu'avec des skis paraboliques et des skis droits, la contribution du métabolisme aérobie à la production totale d'énergie est de 60% et celle du métabolisme anaérobie est de 40%. Ces résultats ont été observés dans des conditions de neige «pas vraiment glacée» et au cours de manches d'une durée respective de 71,9 ± 3,7s et 75,5 ± 4,3s. D'autre part, une étude s'est intéressée à la contribution des différents métabolismes énergétiques à la production totale d'énergie chez l'adolescent. Grenier et al. (2012) montrent chez des skieurs âgés de 14 ± 0,5ans, au cours d'une manche de GS d'une durée de 76,4 ± 10,9s, que la contribution des métabolismes aérobie et anaérobie lactique à la production totale d'énergie représente respectivement 69,7 ± 16,7% et 30,3 ± 16,7 %. La plus grande contribution de la filière aérobie observée chez les enfants, lors d'une épreuve de GS en ski alpin, par rapport

aux adultes est en adéquation avec l'immaturité de la filière anaérobie lactique à cet âge (Ratel et al. 2002).

2.7 - Gestion de l'intensité de ski

Cette partie a pour objectif de comprendre la stratégie de gestion de l'intensité des skieurs alpins. Est-il possible de tenir une intensité maximale de ski du début à la fin d'une manche ? La stratégie varie-elle entre les manches courtes et longues ? Cette partie aborde principalement ce champ de questionnement à l'aune d'études en athlétisme et en cyclisme. En effet, aucune étude ne renseigne quant à la gestion de l'intensité de l'effort en ski alpin.

2.7.1 - Modélisation de la gestion de l'intensité d'effort court

Une stratégie d'allure «all-out» est utilisée par les athlètes et les cyclistes pour des efforts d'une durée maximale de 15s (Wittekind et al. 2011). En revanche, lors d'efforts maximaux de plus de 30s l'intensité initiale est atténuée (Wittekind et al. 2011). De la même manière, pour des efforts de courtes durées, inférieures à 4min, la stratégie d'intensité de l'effort est décroissante (Figure 1.32), c'est-à-dire qu'on observe, à la suite d'un départ intense, une baisse de l'intensité d'effort (Abbiss et Laursen 2008). En effet, lors d'épreuves d'une durée située entre 40s et 120s en course à pied et en cyclisme, la première partie d'effort est systématiquement plus intense que la seconde (Foster et al. 1993 ; Hettinga et al. 2010 ; Ferro et al. 2001 ; Bishop et al. 2002 ; Thompson et al. 2004 ; Tucker et al. 2006). Par exemple, les travaux de Hanon et al. (2010) montrent lors d'un 400m en course à pied une diminution d'environ 15% de la vitesse (par rapport à la vitesse pic) au cours du dernier 100m (Figure 1.32).

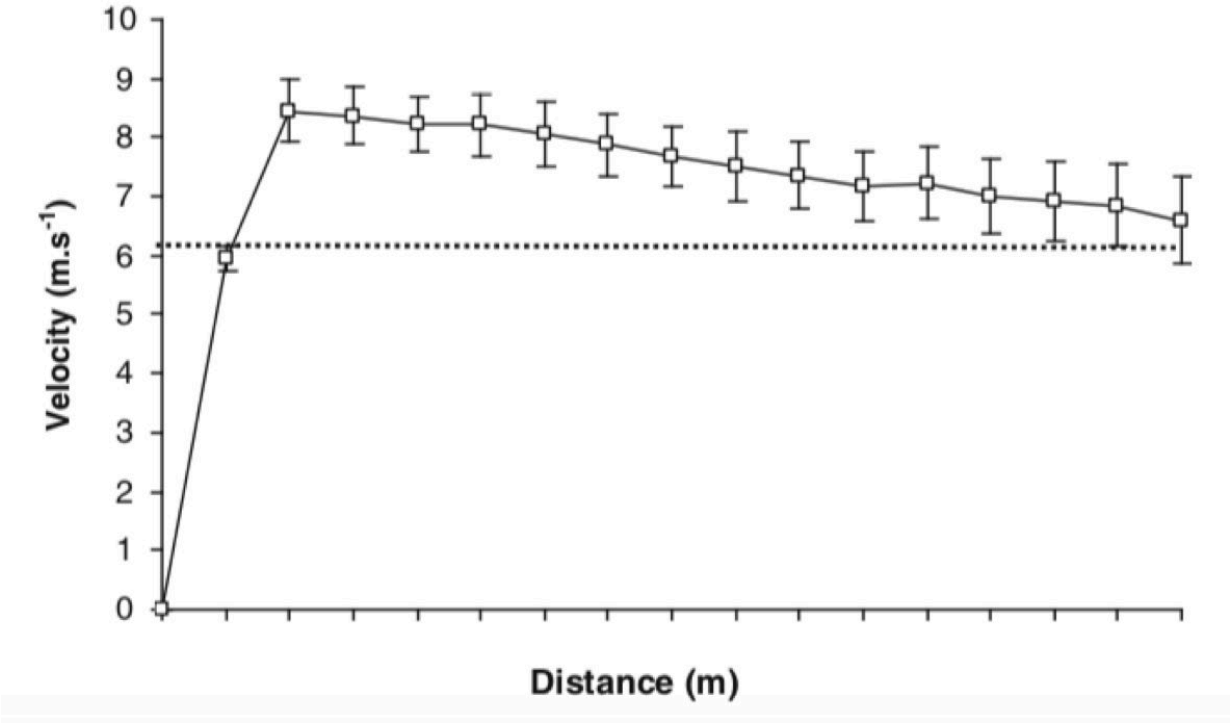


Figure 1.32 - Intensité d'effort décroissante lors d'un 400m en course à pied (d'après Hanon et al. 2010)

2.7.2 - Facteurs influençant la gestion de l'intensité d'effort

2.7.2.1 - Facteurs physiologiques

Les afférences physiologiques constituent, au cours d'un exercice, un système intégratif complexe (Hampson et al. 2004). Il existe un système d'interprétation des feedbacks afférents qui identifie l'intensité d'exercice à un niveau subconscient et dont l'interprétation définit la RPE (Hampson et al. 2004). En effet, dans les efforts à dominante aérobie principalement investigués, la RPE est influencée par la quantité de masse musculaire active (Pandolf 1982), FC (Skinner et al. 1973), $\dot{V}O_2$ et la fréquence respiratoire (FR) (Noble et al. 1973). En ski alpin, une quantité importante de masse musculaire est active et FC_{pic} (Karlsson et al. 1978) et $\dot{V}O_{2pic}$ (Tesch et al. 1978 ; Saibene et al. 1985) atteignent des niveaux élevés qui influencent potentiellement la RPE du skieur et la gestion de l'intensité de l'effort.

2.7.2.1.1 - Paramètres métaboliques

La diminution de l'intensité lors d'un effort court serait la conséquence d'une diminution de la production de force due à l'accumulation des métabolites issues des processus de resynthèse anaérobie (Nummela et al. 1992 ; Taylor et al. 1997). C'est l'accumulation de protons H^+ qui diminue le pH musculaire (Spriet et al. 1989). Dès lors, l'activité enzymatique

(Ca^{2+}) impliquée dans la contraction musculaire serait inhibée (Allen et al. 2008). Ainsi, le niveau d'acidose musculaire constituerait une afférence physiologique jouant un rôle important au niveau de la gestion de l'intensité de l'effort. En ski alpin, sans que l'acidité musculaire soit mesurée, les études montrent des niveaux de $[La]_{pic}$ de 6 à 16mmol.L^{-1} en GS (Burtscher et al. 2000 ; Polat 2016 ; Tesch et al. 1978 ; Saibene et al. 1985 ; Tesch 1995 ; Veicsteinas et al. 1984). Ces niveaux élevés de [La] reflétant une implication importante de la filière glycolytique indiqueraient une accumulation de métabolites pouvant influencer le pH. Cette acidité pourrait influencer la RPE du skieur et la gestion d'intensité de l'effort. De plus, l'accumulation des ions Phosphate Inorganiques et d'Adénosine Diphosphate (ADP) produits de l'hydrolyse de l'Adénosine Triphosphate ainsi que la production d'espèces oxygénées réactives (Peroxyde d'Hydrogène, ions Superoxyde, ions Hydroxyle) influencent également la diminution de production de force musculaire lors d'exercices courts et intenses (Allen et al. 2008).

2.7.2.1.2 - Paramètres musculaires

Les travaux de Baron et al. (2009) montrent une différence de stratégie de gestion de l'effort en fonction du type de contraction musculaire majoritairement mise en jeu en course à pied. La plus grande réduction de la vitesse constatée lors des sprints réalisés en descente (-4,7% de pente), par rapport à des sprints réalisés à plat ou en montée (+4,7% de pente), suggère que la vitesse de course est régulée en fonction des feedbacks émis par les mécanorécepteurs de façon à prévenir des dommages musculaires trop importants dus aux contractions musculaires majoritairement excentriques (Baron et al. 2009). Ainsi, la RPE serait influencée par le type de contraction musculaire prioritairement sollicitée (Stamford et Noble 1974 ; Takai 1998). En ski alpin, la contraction musculaire des extenseurs de l'articulation du genou est majoritairement excentrique (Coulmy et al. 2010 ; Coulmy 2011 ; Meyer 2012). Cette caractéristique pourrait influencer la RPE et la gestion de l'intensité de l'effort du skieur.

2.7.2.2 - Facteurs perceptifs

2.7.2.2.1 - Perception de la durée de l'effort restant à accomplir

Le cycliste confronte perpétuellement la perception qu'il a de son état physiologique avec la durée du parcours restant à accomplir (Swart et al. 2009 ; Wittekind et al. 2011 ; Amann et Secher 2010). L'individu doit connaître l'éloignement de la ligne d'arrivée dès le début de l'exercice afin de mettre en œuvre le processus anticipationnel permettant d'optimiser la gestion de l'intensité de l'effort (Baden et al. 2005). Baden et al. (2005) ont montré que la

méconnaissance de la durée d'exercice engendre l'atteinte de plus hautes valeurs de difficulté perçue pour une intensité donnée. De Koning et al. (2011) proposent que la gestion de l'intensité de l'effort ne prenne pas en compte la durée restante mais la proportion de l'effort restant (par rapport au temps d'effort global). En ski alpin, de manière empirique, la perception de la durée du parcours dépendrait de la connaissance du tracé intégrée lors de la reconnaissance. La perception de la difficulté du parcours restant à effectuer dépend de sa connaissance du tracé (écarts horizontaux et verticaux entre les portes, changements de rythme), de la piste (inclinaison de la pente, dévers) et de la neige (qualité, dégradation).

2.7.2.2.2 - Perception de l'environnement

Des travaux soulignent le rôle de l'interaction du sportif avec l'environnement qui serait à la base des prises de décisions du sportif dans la régulation de l'intensité de l'effort. Ces informations s'ajouteraient à celles déjà évoquées précédemment sur les contraintes physiologiques (Smits et al. 2014 ; Renfree et al. 2014). Dans une acception dynamique, le couplage de la perception et de l'action (Gibson 1979) serait un processus médian de la prise de décision en matière de gestion de l'intensité de l'effort (Cisek et Kalaska 2010). La notion d'affordance revêt un caractère central selon cette approche (Gibson 1977, 1979). Elle fait référence à la perception des caractéristiques pertinentes de l'environnement, supports des choix d'action de modulation de l'intensité de l'effort. Les exigences environnementales ainsi que les besoins et possibilités d'actions subséquentes de l'individu sont perpétuellement réactualisés (Gibson 1977, 1979 ; Smith et Pepping 2010). En effet, les perceptions visuelles telles que le flux optique influencent la RPE lors d'un effort de 20km en cyclisme (Parry 2012). Lors de la conduite routière, lorsque le temps est brumeux, le conducteur conduit plus prudemment dans le sens où il décélère afin de pouvoir regarder plus attentivement l'environnement et d'éventuelles voitures (Bach et Dolan 2012). En ski alpin l'environnement fournit une grande quantité d'informations dans la mesure où il est irrégulier et variable. Ne pas percevoir ou mal interpréter une information peut provoquer une chute. De plus, le canal perceptif visuel, prédominant, est régulièrement altéré par les conditions climatiques qui obligeraient soit à prendre davantage de risques de chute à cause d'une perception moins pointue de l'environnement, soit à diminuer l'intensité d'effort afin qu'une vitesse inférieure permette de bénéficier d'un temps perceptif plus important et/ou de minimiser l'impact des éléments environnementaux non anticipés. Ainsi, la qualité de la perception de l'environnement ainsi que la complexité de l'environnement du ski alpin pourraient influencer la gestion de l'intensité de ski.

2.7.2.3 - Facteurs neurophysiologiques

2.7.2.3.1 - Influence de l'expérience

Plus l'expérience d'un type d'effort est importante, plus la gestion de l'intensité de l'effort est optimisée (Wittekind et al. 2011 ; Amann et al. 2010 ; Foster et al. 2009 ; Mauger et al. 2009 ; Baron et al. 2010). C'est à dire que l'individu accepte à mesure que l'expérience augmente de prendre un départ plus intense sans pour autant provoquer une chute marquée de l'intensité d'effort en fin d'exercice. L'apprentissage de l'intensité de l'effort s'effectuerait très tôt dans la carrière de l'athlète (Foster et al. 2004 ; Foster et al. 2009), de sorte que les émotions développées par l'entraînement soient mémorisées et influencent les stratégies d'intensité de l'effort jugées optimales (Baron et al. 2011). Chaque émotion mémorisée lors de chaque session d'entraînement améliorerait la quantité et la qualité des informations enregistrées (Foster et al. 2009 ; Mauger et al. 2009). En utilisant ces données, l'athlète serait capable de comparer la charge affective ressentie lors d'un exercice précédent avec celle générée par l'exercice en cours. De la sorte, l'athlète deviendrait capable de mieux contrôler l'intensité de l'effort (St Clair Gibson et al. 2006), en sélectionnant un niveau de charge affective approprié pour soutenir l'intensité d'exercice lors de la durée d'exercice planifiée. La gestion de l'intensité de l'effort semble donc être dépendante d'une programmation préétablie très robuste, qui nécessite beaucoup de temps et de pratique pour être modifiée (St Clair Gibson et Foster 2007).

De plus, l'intégration et la stabilisation d'une stratégie de gestion de l'effort lors d'une épreuve physique donnée est le résultat d'un apprentissage qui nécessite de la répétition (Mauger et al. 2009 ; Foster et al. 2009). En effet, l'individu partant au premier essai dans un inconnu relatif prend une marge de sécurité afin que sa RPE n'atteigne pas des niveaux trop élevés trop tôt dans l'épreuve, ce qui aurait comme conséquence une forte chute d'intensité dans la partie finale. Au regard de l'intégration en mémoire de cet effort, l'individu prend de moins en moins de marge afin de se rapprocher d'une performance dont la gestion de l'intensité d'effort serait plus optimale au regard de la perception de son potentiel. Ainsi Mauger et al. (2009) montrent que, sans feedback de la distance, des cyclistes sont capables de s'approcher en 4 essais de leur record personnel (avec feedback de la distance) sur 4km de contre la montre. Les essais 1 à 3 auraient permis de constituer la mémoire nécessaire pour inhiber la prise de marge en termes de gestion de l'intensité de l'effort. Cette étude met en exergue l'importance de la confiance de l'individu en sa capacité à terminer l'épreuve sans élévation trop précoce de la RPE. Les travaux d'Albertus et al. (2005) et Ansley et al. (2004) montrent, chez des experts très familiers avec un type d'effort, que la gestion de l'intensité de l'effort est robuste et

principalement déterminée en début d'effort. En effet, si des feedbacks erronés de distance parcourue sont fournis, ni l'intensité d'effort ni la RPE ne sont affectées (Albertus et al. 2005). En revanche, si la durée d'effort annoncée (30s) est plus courte que celle à réaliser (36s), les 6 dernières secondes sont significativement moins intenses que lorsque 36s d'effort sont annoncées au préalable (Ansley et al. 2004). Ces travaux renforcent le rôle fondamental de la reconnaissance du tracé en ski alpin. En effet, même sur une piste identique, deux tracés sont toujours différents. Si l'intensité d'effort est principalement déterminée dès le départ de l'épreuve, il s'agit d'avoir une connaissance précise de l'épreuve afin d'être à même d'optimiser la stratégie d'intensité de l'effort dont les ajustements en cours d'épreuve seraient à la marge. Ainsi, améliorer la connaissance de l'exercice et la certitude du point d'arrivée de l'effort permet d'adopter une stratégie d'intensité d'effort plus agressive - de laquelle résulte une RPE plus élevée - permettant une meilleure performance (Swart et al. 2009).

2.7.2.4 - Facteurs psychologiques

2.7.2.4.1 - Risque de chute et de blessure

L'individu module également son intensité d'effort de manière à limiter le risque de blessures (Foster et al. 2009). En ski alpin, la grande majorité des blessures surviennent à l'issue d'une chute (Bere et al. 2011 ; Crestani 2012). Ainsi, le risque de chute implique un risque de blessure. Dès lors, la baisse d'intensité de l'effort du skieur impliquerait (i) le risque de ne pas rallier l'arrivée (pour cause de chute), et (ii), le risque de blessure. L'intensité d'effort initiale est corrélée à la perception du risque. Ainsi, une perception faible du risque est associée à un départ rapide et inversement (Micklewright et al. 2015). Le risque dépendrait des caractéristiques de la tâche au regard des caractéristiques de l'individu qui s'apprête à la réaliser, mais également de la propension générale à la prise de risque de l'individu. Il est alors possible de dissocier la mesure de la propension à la prise de risque de celle de la perception du risque (Blias et Weber 2006).

2.7.2.4.2 - Motivation

La persistance dans la difficulté de la tâche est sous-tendue par le niveau de motivation extrinsèque (Wright 1998, 2008 ; Amann et al. 2010). En effet, des encouragements réguliers toutes les 20 ou 60s (forme de motivation extrinsèque) améliorent la persistance dans l'effort par rapport à des encouragements moins réguliers (toutes les 180s) ou pas d'encouragements du tout (Andreacci et al. 2002). Ces bénéfices peuvent également provenir d'auto

encouragements (Blanchfield et al. 2014). L'acceptation de la difficulté d'effort perçue doit être continuellement gérée en fonction de la distance restant à parcourir et des efforts psycho-perceptifs que l'athlète accepte de consentir (Tucker 2009). La pénibilité de l'effort rentrerait en considération. En effet, Baron et al. (2011) évoquent la volonté de l'individu de se protéger d'une mise en danger affective avant la fin de l'épreuve, tant sur le plan physiologique qu'émotionnel. Pour Baron et al. (2011), le désir de soutenir un haut niveau de difficulté d'effort perçue durant l'exercice dépend de la différence entre la charge affective maximale tolérée et le niveau de charge affective effectivement ressenti durant l'exercice. Ces aspects motivationnels seraient également à prendre en considération dans l'analyse de gestion de l'intensité de ski.

2.7.2.4.3 - Fatigue mentale

Au niveau des facteurs psychologiques influençant la performance, l'état de fatigue mental pré-effort semble discriminant par son effet sur la performance. En effet, la fatigue mentale augmente la perception de la fatigue sans que les paramètres physiologiques soient modifiés. Ainsi, le niveau maximal de fatigue perçu et acceptable par l'individu serait atteint de manière prématurée en condition de fatigue mentale (Marcora et al. 2009 ; Wright et al. 2008). De ce fait, l'intensité de l'effort serait limitée. Ainsi, la fatigue mentale - dont les origines peuvent être variées – pourraient également influencer la gestion de l'intensité de ski.

2.7.2.5 - La RPE paramètre intégratif des facteurs d'influence de la gestion de l'intensité d'effort

L'ensemble des études présentées dans la partie 2.7 suggère que la stratégie d'intensité d'effort dépend de multiples paramètres : les afférences physiologiques (métaboliques et musculaires), perceptives (durée d'effort restante, environnement), psychologiques (risque de chute, la motivation, fatigue mentale). Ces paramètres seraient continuellement comparés à l'expérience que l'individu en a (Noakes et al. 2004). Tous ces paramètres seraient pris en compte et traités de manière complexe au niveau central afin de définir la RPE (De Koning et al. 2011 ; Faulkner et al. 2008 ; St Clair Gibson et al. 2003, 2006 ; Tucker 2009). La RPE augmenterait linéairement jusqu'à la fin de l'effort (Faulkner et al. 2008). En effet, la progression linéaire de la RPE jusqu'à la fin de l'effort ne serait pas altérée par l'ajout de contraintes environnementales (hypoxie) au milieu de l'effort (Joseph et al. 2008). L'individu diminuerait l'intensité de l'effort afin de respecter la pérennité de l'augmentation linéaire de RPE (Joseph et al. 2008).

Ainsi, le système nerveux central « calculerait » une possible conservation de l'intensité de l'effort à un instant t jusqu'à la fin de l'exercice. Le système nerveux central analyserait la projection linéaire de RPE et l'atteinte d'un niveau maximal acceptable avant la fin de l'effort (Marcora 2008). Si tel est le cas, l'individu diminuerait l'intensité de l'effort. Il en résulterait une moindre RPE dont la projection linéaire n'atteindrait un niveau maximal acceptable qu'à l'arrêt final de l'effort. Ainsi, l'intensité d'effort dépendrait de l'écart entre la RPE cible (à un instant t) et la RPE réelle (Tucker et Noakes 2009). Si la RPE réelle est inférieure à le RPE cible, le système nerveux central augmenterait l'intensité de l'effort. Si la RPE réelle est supérieure à la RPE cible, le système nerveux central inhiberait l'intensité d'effort. Dès lors, la gestion de l'intensité de l'effort émanerait d'ajustements continuels pilotés par le système nerveux central (Noakes et al. 2004). Il n'existerait donc pas de transition distincte entre les processus d'anticipation de la stratégie de gestion de l'intensité et de régulation de celle-ci par les feedbacks afférents, mais davantage une intégration continue de ces deux composantes (Tucker 2009).

BUTS ET HYPOTHESES DE TRAVAIL

La première partie de notre revue de littérature a présenté le ski alpin de compétition en détaillant la logique interne de l'activité, les différentes disciplines, les modes de classement, le parcours d'accès au haut niveau, la programmation annuelle de l'entraînement du skieur alpin de haut niveau ainsi que les caractéristiques des compétitions et des entraînements. La seconde partie s'est attachée à décrire les facteurs de performance fixant les objectifs d'entraînement. Ces facteurs de performance revêtent un caractère éminemment complexe de par leurs interrelations. Il s'agit des facteurs perceptivo-décisionnels, biomécaniques, neuromusculaires, énergétiques, psychosociologiques et de gestion de l'intensité de ski au service de la technique. Cette vision complexe du ski alpin semble nécessaire puisque reflétant le plus fidèlement possible l'activité et les synergies la régulant. Nos travaux tentent ainsi de conserver ce paradigme dans la démarche de recherche bien que les interrogations principales s'articulent autour de la physiologie de l'effort. Les travaux expérimentaux présentés dans la partie suivante s'articulent autour de quatre axes majeurs.

Premièrement, l'amélioration des objectifs et des contenus d'entraînement du skieur alpin demande au préalable une connaissance précise de la discipline. Au niveau des demandes métaboliques, la connaissance du ski alpin nécessite en effet d'être précisée. Ainsi, (i) il n'existe pas de réel consensus concernant les demandes métaboliques en GS; (ii) les demandes métaboliques n'ont pas encore été investiguées en SL contemporain; et, (iii) les différences de demandes métaboliques entre deux durées d'effort différentes dans une discipline n'ont pas été clarifiées. Le but de **l'étude n°1** était d'investiguer les demandes métaboliques ($\dot{V}O_2$, $[La]_s$, FC) et d'estimer la part de contribution des systèmes énergétiques (aérobie et anaérobie lactique) au cours de différentes durées de GS et SL chez des skieurs alpins entraînés. Notre hypothèse était que la discipline (SL ou GS) et la durée d'effort (court ou long) produiraient des différences au niveau des demandes métaboliques.

Deuxièmement, l'entraînement se décline en préparation spécifique et non spécifique. Si la pratique du ski *in situ* semble présenter un caractère spécifique aux contraintes compétitives, les contraintes saisonnières, météorologiques, financières et logistiques du ski alpin contraignent les entraîneurs à trouver d'autres solutions d'entraînement hors neige, les plus spécifiques possible, notamment au niveau énergétique. La spécificité physiologique d'une motricité ne peut être déterminée qu'en comparant ses contraintes physiologiques avec celles du ski alpin *in situ*. Le but de **l'étude n°2** était donc de comparer les demandes physiologiques

($\dot{V}O_2$, $[La]_s$, FC, contribution des systèmes énergétiques (aérobie et anaérobie lactique)) entre le ski alpin *in situ* (SL et GS) et différentes motricités (box test, slide, course à pied, cyclisme, bonds latéraux sur trampoline) sur une durée d'effort identique chez des skieurs alpins entraînés. Notre hypothèse était que le slide, les bonds latéraux sur box et les bonds latéraux sur trampoline seraient spécifiques des contraintes physiologiques du SL et du GS, et que ça ne serait pas le cas pour la course à pied et le cyclisme.

Troisièmement, les entraîneurs ont besoin de disposer de tests physiques qui soient à la fois spécifiques, précis et facilement utilisables sur le terrain. En effet, un test physique spécifique permettrait (i) d'objectiver les effets physiologiques spécifiques de l'entraînement, (ii) de monitorer de manière longitudinale l'état de forme des athlètes afin d'éviter les épisodes de surmenage non fonctionnel, (iii) de placer des objectifs intermédiaires lors du processus de réathlétisation, et (iv) de fixer des seuils minimaux d'exigence tout au long du processus de détection. Le but de **l'étude n°3** était donc de déterminer la reproductibilité du 80s-slide-test en mesurant différentes variables physiologiques ($\dot{V}O_2$, $[La]_s$, FC), biomécaniques (nombre total d'appuis, index de fatigue) et perceptives (RPE) chez des skieurs entraînés. Notre hypothèse était que le 80s-slide-test est reproductible chez des skieurs alpins entraînés.

Quatrièmement, les entraîneurs ont besoin de préciser les stratégies d'allures chez le skieur alpin afin de mieux comprendre les facteurs limitants de la performance. Ces connaissances permettraient d'affiner les objectifs d'entraînement et les contenus subséquents chez les skieurs alpins, et également de progresser dans la compréhension de la gestion de l'intensité d'effort lors de motricités complexes. Le premier but de **l'étude n°4** était de décrire la stratégie d'allure du skieur alpin au cours d'une manche longue de GS. Notre première hypothèse était que le skieur alpin adopte une stratégie d'allure au cours d'une manche longue de GS (enchaînement section 1 et section 2, soit 81s d'effort) en anticipant la diminution de l'intensité au cours de la section 1 (premières 52s) puis au cours de la section 2 (dernières 29s). Le deuxième but de notre étude était d'analyser les relations entre la gestion de l'intensité du ski et l'évolution de la RPE. Notre seconde hypothèse était que le skieur diminue l'intensité de son ski avec une RPE inférieure en fin de section 1 lors d'une manche complète (section 1+2) par rapport à un arrêt de l'effort en fin de section 1.

METHODOLOGIE ETUDES 1-4

1 – Méthode

1.1 - Sujets (études 1 et 2)

Huit skieurs alpins entraînés (4 femmes et 4 hommes) ont participé de manière volontaire aux études 1 et 2. La moyenne (± ET) pour l'âge, la taille, le poids des skieurs était respectivement de 18,2 ± 0,8 (16,8 – 19,3) ans, 1,72 ± 0,10 m et 65,8 ± 12,0 kg. Ils s'entraînaient à ski au moins cinq fois par semaine durant la période hivernale. Tous les sujets étaient des compétiteurs actifs et participaient à des compétitions internationales (FIS). Ils avaient 66,4 ± 11,7 points FIS. Avant les tests, tous les sujets étaient informés du protocole expérimental, incluant les éventuels risques et bénéfices. Tous les sujets (ainsi que les responsables légaux pour les trois skieurs mineurs) avaient donné leur consentement écrit à la participation à cette expérimentation.

1.2 - Procédure (études 1 et 2)

Lors des tests de terrain en ski, le rapport du nombre de portes sur la dénivellation était conforme au règlement FIS des Coupes d'Europe et Coupes du Monde. Afin de reproduire les conditions de compétitions, il était demandé aux sujets de conduire leur échauffement comme à l'accoutumé avant une compétition et de reproduire cet échauffement à l'identique lors de chaque session expérimentale. Après l'échauffement, le matériel portable d'analyse des échanges gazeux et un cardiofréquencemètre étaient installés sur les sujets. Tous les tests de terrain ont été réalisés avec du matériel de ski préparé à cet effet et homologué par la FIS. Le stade olympique de slalom utilisé pour l'expérimentation était homologué par la FIS pour les compétitions internationales de SL et GS. Il était demandé aux sujets de standardiser leur alimentation 24h avant chaque session expérimentale. Les repas avaient lieu à la même heure et au même endroit. Il était demandé aux sujets de s'abstenir de consommation d'alcool et d'activité physique intense 24h avant chaque session expérimentale. Trois à cinq jours après les tests de terrain, les sujets réalisaient, en laboratoire, un test d'effort maximal sur ergocycle afin de déterminer leur $\dot{V}O_{2max}$. Tous les sujets étaient familiers avec ce type de test d'effort maximal. Les sujets visitaient au préalable le laboratoire pour une session de familiarisation avec le matériel expérimental. Les études étaient conformes aux recommandations de la Déclaration d'Helsinki et étaient approuvées par le comité local d'éthique.

Chaque matin de test de terrain (8h), un expert (ancien entraîneur national) plaçait précautionneusement les portes des tracés sur la piste damée la veille au soir, comme décrit dans la Figure 2.1. Le nombre de portes, le nombre de virages et la longueur de la piste étaient

choisis pour simuler une compétition internationale conforme à la réglementation FIS (Figure 2.1). La distance entre les portes était fixée à 11m en SL et 25m en GS. La réglementation n'imposant pas l'écart horizontal entre les portes, celui-ci était fixé et standardisé par secteur de pente de manière à reproduire les conditions de compétitions, comme présenté dans la Figure 2.1. La disposition des portes respectait la réglementation FIS relative au rapport (arrondi sans décimale) du nombre de changements de direction et de la dénivellation (m): 11-15% et 30-35 ± 3%, respectivement pour le GS et le SL. Les distances horizontales et les distances entre les portes étaient mesurées par un ruban métrique de 50m. Ces distances étaient répliquées entre les sessions CT et LG pour le SL et pour le GS. La ligne d'arrivée du SL et du GSLG était identique à celle du SL et du GSCT. Les lignes de départ du SLLG et du GSLG étaient placées en amont sur la piste par rapport à ceux du SLCT et du GSCT.

Les quatre sessions de tests de terrain étaient conduites à l'intérieur d'une même fenêtre de 2h pour chaque sujet (entre 9h et 15h) pour minimiser l'effet des variations biologiques diurnes (Carter et al. 2002). Tous les tests étaient réalisés dans des conditions environnementales similaires (luminosité, entre ensoleillé sans nuage et ensoleillé avec quelques nuages ; température ambiante, entre -4 et +2°C ; température du manteau neigeux, -5,0 ± 1°C ; vent, entre 0 et 12 $km.h^{-1}$), à des altitudes de départ et d'arrivée représentées dans la Figure 2.1.

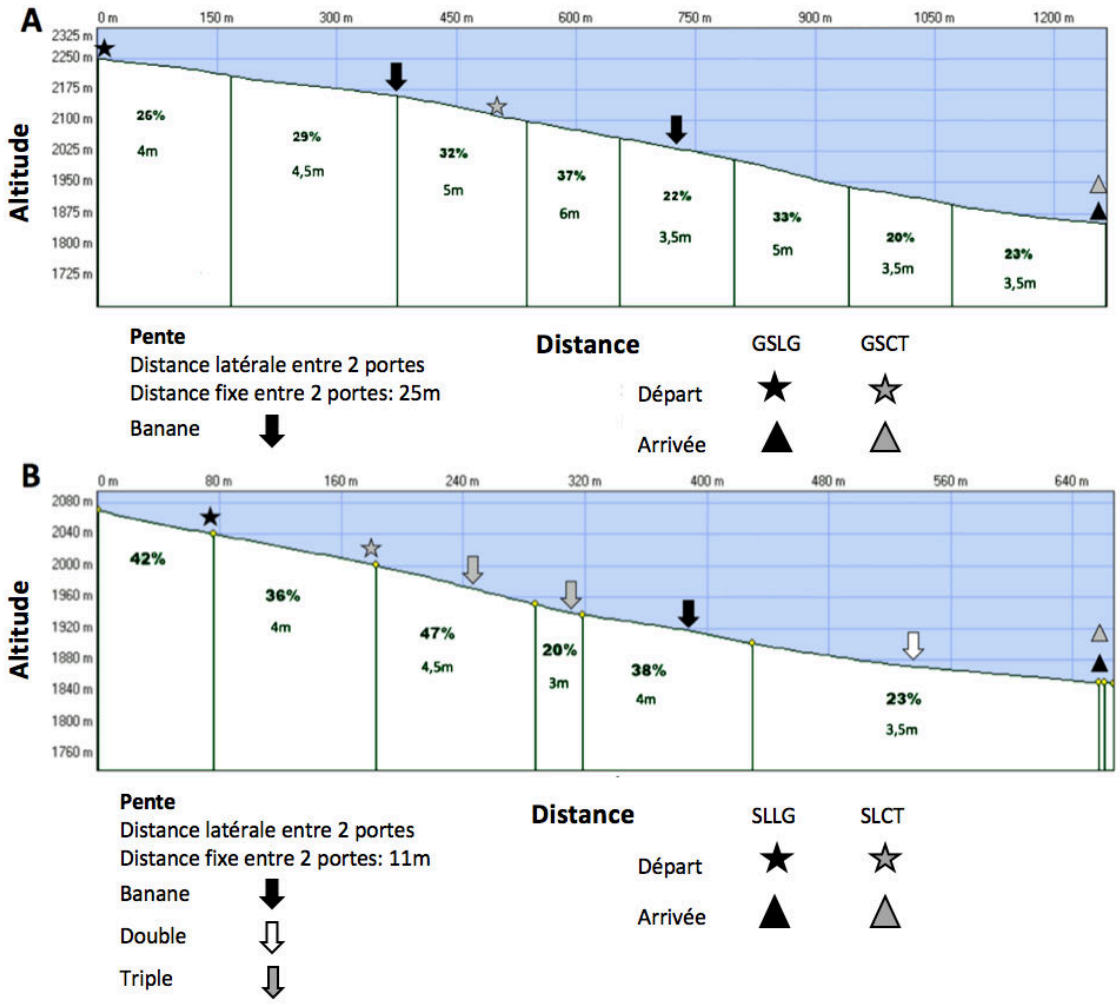


Figure 2.1 - Caractérisation des slaloms géants (**A**) et slaloms (**B**)

SLCT: slalom court ; SLLG: slalom long ; GSCT: slalom géant court ; GSLG: slalom géant long.

1.3 - Mesures en laboratoire

1.3.1 - Test d'effort maximal (études 1, 2 et 3)

$\dot{V}O_{2max}$ était déterminée à l'issue d'un test incrémental sur ergocycle (Erg 550, Bosch, Germany) mené jusqu'à l'épuisement et l'arrêt volontaire du sujet. Les sujets étaient continuellement surveillés et fortement encouragés. La fréquence de pédalage était imposée à des valeurs supérieures à 80 rpm tout au long du test. La résistance initiale était fixée à 80W, puis augmentée de 25W toutes les deux minutes jusqu'à l'arrêt volontaire (Heil et al. 1995) du sujet. PMA était mesurée à la fin du test mené jusqu'à épuisement. $\dot{V}O_2$ et FC étaient mesurées de manière continue tout au long du test et [La] était mesurée 3min post-test (Bangsbo et al. 1994).

1.3.2 - Mesures *in situ*

1.3.2.1 - Mesures des échanges gazeux et de la fréquence cardiaque (études 1, 2 et 3)

Les valeurs d'échanges gazeux cycle à cycle étaient moyennées à l'aide d'une moyenne mobile de 5s afin d'obtenir $\dot{V}O_{2max}$, $\dot{V}O_{2pic}$ et le quotient respiratoire moyen (QR_{moy}). $\dot{V}O_2$ était également moyenné toutes les 5s ($\dot{V}O_{2\ moy\ 5s}$). Les valeurs cycle à cycle distantes de plus de 3 ET de la moyenne mobile étaient supprimées des données (Lamarra et al. 1987). $\dot{V}O_{2pic}$ et $\dot{V}O_{2moy}$ étaient exprimées en pourcentage de $\dot{V}O_{2max}$. Les différences d'altitudes entre le test d'effort maximal (479m) et l'altitude moyenne des tests de terrain étaient calculées. Une diminution de $\dot{V}O_{2max}$ de 6,3% pour 1000m d'altitude était appliquée afin d'estimer $\dot{V}O_{2max}$ à l'altitude de test (Wehrlin et Hallen 2006).

1.3.2.2 - Recueil et détermination de [La] et RPE (études 1, 2, 3 et 4)

Un micro-prélèvement sanguin (3µl) était réalisé au bout du doigt avant chaque test ainsi que 3 et 5min après chaque test (en position debout) pour mesurer [La]. $[La]_{pic}$ était considérée comme la valeur la plus élevée de [La] mesurée entre la troisième et la cinquième minute post test. Delta (Δ) [La] était calculé comme la différence entre $[La]_{pic}$ et [La] mesurée au repos. Trois minutes après la réalisation de chaque test, il était demandé aux sujets d'indiquer leur RPE.

1.3.2.3 - Enregistrement vidéo (études 1 et 2)

Pour les tests à ski, les enregistrements étaient utilisés pour déterminer les temps d'efforts, du moment où le skieur bougeait au départ jusqu'au moment où le skieur touchait la dernière porte. L'enregistrement vidéo était réalisé d'un point dominant de la piste permettant une vue claire et dégagée de l'ensemble du tracé. Les enregistrements vidéo étaient également utilisés pour mesurer la fréquence gestuelle (changements de direction en SL, GS, slide test, bonds latéraux sur trampoline et bonds latéraux sur box; fréquence de foulée et de pédalage respectivement en course à pied et cyclisme).

2 - Recueil des variables physiologiques, temporelles et perceptives

2.1 - Mesure des échanges gazeux et respiratoire (études 1, 2 et 3)

$\dot{V}O_2$ et $\dot{V}CO_2$ étaient mesurées en continu (cycle à cycle) en utilisant un système portable d'analyse des échanges gazeux (Metamax, Cortex, Germany) validé (Kirkeberg et al. 2011; Lourenco et al. 2011) (masse : 1,3 kg ; dimensions : 235 x 165 x 85 mm). La variabilité de mesure de $\dot{V}O_2$ avec ce système est de ± 2-6% (Kiekeberg et al. 2011; Lourenco et al. 2011;

Vogler et al. 2010; Macfarlane et al. 2012). Avant chaque test, les systèmes d'analyse de l'O_2 et du CO_2 étaient calibrés en utilisant l'air ambiant et des concentrations connues d'O_2 et CO_2 (16% et 5%, respectivement). La calibration du volume était réalisée grâce à une seringue de 3000 mL (Cortex, Germany).

2.2 - Mesure de la fréquence cardiaque (études 1, 2 et 3)

La fréquence cardiaque était mesurée et enregistrée à l'aide d'un cardiofréquencemètre (V800 et H7, Polar, Kempele, Finlande).

2.3 - Mesure de la lactatémie sanguine (études 1, 2, 3 et 4)

Les mesures de [La] étaient réalisées à l'aide d'un analyseur portable (Lactate Pro 2, Arkray, Kyoto, Japon) validé (Bonaventura et al. 2015). La variabilité de mesure du Lactate Pro 2 est de 4,4% de manière générale, 5,1% de 0-1,9mmol.L^{-1}, 3,0% de 2,0-4,9mmol.L^{-1}, 2,7% de 5,0-9,9mmol.L^{-1}, 4,3% de 10,0-14,9mmol.L^{-1} et 3,0% au-delà de 15,0mmol.L^{-1} (Bonaventura et al. 2015).

2.4 - Mesure chronométrique (études 1, 2, 3 et 4)

Les tests de terrain étaient filmés à l'aide d'une caméra (Sony, DCR-SX34). La fréquence d'acquisition était de 50 Hz. Le désentrelacement des images permettait une précision chronométrique de 0,02s.

2.5 - Mesure de la difficulté perçue de l'effort (études 1, 2, 3 et 4)

Les mesures de la difficulté perçue de l'effort étaient réalisées à l'aide de l'échelle de Borg de 6 à 20 (Borg 1970).

3 - Traitement des données

3.1 - Détermination de $\dot{V}O_{2max}$ (études 1, 2 et 3)

$\dot{V}O_{2max}$ correspondait à la plus haute valeur de $\dot{V}O_2$ atteinte au cours de deux périodes successives de 15s au cours du test d'effort incrémental réalisé jusqu'à l'arrêt volontaire du sujet. $\dot{V}O_{2max}$ était considérée comme atteinte lorsqu'à minima trois des quatre critères suivants étaient observés: 1) un plateau de $\dot{V}O_2$ malgré l'augmentation de la puissance développée (augmentation de $\dot{V}O_2$ à $\dot{V}O_{2max} \leq 150$ mL.min^{-1}) (Taylor et al. 1955); 2) un QR supérieur à 1,1

(Moseley et al. 2001); 3) un état visible d'épuisement, et; 4) une FC_{pic} à moins de 10 bpm de FC_{max} estimée [210 - (0,65 x âge)] (Spiro, 1977).

3.2 - Estimation de la contribution des systèmes énergétiques (études 1 et 2)

L'estimation de la contribution du système aérobie était réalisée à partir de $\dot{V}O_2$ en appliquant un équivalent de 20,9kJ.L $O2^{-1}$ (Bertuzzi et al. 2016) afin de calculer le débit énergétique aérobie ($\Delta E\ O_2$). En effet, si le caractère supramaximal de SL et de GS suggère une sollicitation prédominante du substrat glucidique, l'environnement froid dans lequel se sont déroulées les expérimentations suggèrent à contrario une sollicitation de substrat lipidique (Haman et al. 2002). L'estimation de la contribution du système anaérobie était scindée en deux composantes, le système glycolytique et le système des phosphagènes. Premièrement, Δ[La] était calculé comme la différence entre la plus haute valeur de [La] post test et la valeur de [La] pré test. Une valeur de 1 $mmol.L^{-1}$ Δ[La] était considérée équivalente à 3mL $O_2.kg^{-1}$ de poids de corps (Bertuzzi et al. 2016) afin de calculer le débit énergétique glycolytique (ΔE[La]). Deuxièmement, le débit énergétique du système des phosphagènes (ΔEaLa) était basé sur $416J.kg^{-1}$ de poids de corps au regard de la déplétion des stocks de PCr dans les muscles actifs lors d'un exercice épuisant (Zamparo et al. 2011).

Le débit énergétique total (ΔE en $kJ.min^{-1}$) était calculé d'après l'équation suivante (Bertuzzi et al. 2016):

$$\Delta E = \Delta EaLa + \Delta E[La] + \Delta E\ O_2$$

De cette manière, la contribution des systèmes aérobie, glycolytique et phosphagène était exprimée en pourcentage du débit énergétique total.

4 - Analyse statistique (études 1 et 2)

Les données étaient exprimées en valeur moyenne ± ET. Sur la base d'une analyse de puissance (puissance désirée = 0,80 et erreur alpha = 0,05), il a été déterminé que la taille de l'échantillon (n = 8) était suffisante pour étudier les demandes énergétiques caractéristiques de SL et GS. L'effect size (ES) était évalué par le test de Cohen's d. Les valeurs d'ES avaient un intervalle de confiance de 95%. Les ES de ≤ 0,2, 0,21-0,60, 0,61-1,20, 1,21-2,0, ≥ 2,0 étaient respectivement considérés comme mauvais, faibles, modérés, larges, très larges (Batterham et Hopkins 2006). ES était calculé au regard de la moyenne et de la variance. Lorsqu'une différence significativité était observée, le pourcentage de différence entre les deux valeurs était

présenté avec un intervalle de confiance (IC) de 95%. Les comparaisons intra-tests relatives aux contributions aérobie, glycolytique et phosphagène, à la consommation d'oxygène de départ ($\dot{V}O_{2départ}$), $\dot{V}O_{2moy}$, $\dot{V}O_{2pic}$, $FC_{départ}$, FC_{moy}, FC_{pic}, $[La]_{pic}$, $\Delta[La]$, RPE étaient réalisées à l'aide d'une analyse de variance ANOVA à deux voies pour mesures répétées (XLStat 2017, Paris, France). Les tests Honest significant difference (HSD) Tukey et Student–Newman–Keuls post hoc étaient réalisés en cas de significativité. Le niveau de significativité était placé à $p < 0,05$.

PRESENTATION DES TRAVAUX EXPERIMENTAUX

1 – Etude n°1 : Demandes énergétiques au cours de différentes durées de GS et SL *in situ* chez le skieur alpin entraîné

Bottollier V, Coulmy N, Le Quellec L, Prioux J.

Energy demands in well-trained alpine ski racers during different duration of slalom and giant slalom.

Journal of Strength and Conditioning Research.

1.1 - Introduction

Les entraîneurs doivent connaître les contraintes physiologiques du ski alpin afin de planifier avec pertinence les objectifs d'entraînement menant à des adaptations physiologiques spécifiques. Le ski alpin de compétition inclut principalement les disciplines techniques (SL, GS) et les disciplines de vitesse (SG, DH). Lors des épreuves techniques, les skieurs doivent composer avec d'importantes forces de réaction du sol (>3 $N.BW^{-1}$) (Berg et al. 1995 ; Spörri et al. 2016), répétées toutes les 0,90 ± 0,04s en SL et 1,45 ± 0,11s en GS (Spörri et al. 2016). Ces contraintes sont soutenues entre 43 et 82s en fonction de la discipline, du profil de piste et de tracé. Alors que ces caractéristiques catégorisent le SL et le GS comme des exercices de haute intensité et de courte durée, aucun réel consensus n'est établi quant à la prédominance du système glycolytique ou aérobie (Patterson et al. 2014).

Durant les années 1980, Veicsteinas et al. (1984) et Saibene et al. (1985) ont mené des études *in situ* montrant une prédominance énergétique du système glycolytique en GS. Ces études ont estimé la contribution des métabolismes énergétiques en utilisant la méthode de la balance énergétique (di Prampero 1981) chez des adultes (Veicsteinas et al. 1984 ; Saibene et al. 1985) et des enfants (Grenier et al. 2012). Toutefois, Burtscher et al. (2000) montrent au cours d'une étude *in situ* que le métabolisme aérobie joue un rôle clé (60 % du débit énergétique total) au cours d'un GS. Cependant, les auteurs ne précisent pas leur méthode d'estimation de la contribution des métabolismes énergétiques. Des valeurs de $[La]_{pic}$ de 6 à 16$mmol.L^{-1}$ sont reportées chez l'adulte en GS (Tesch et al. 1978 ; Veicsteinas et al. 1984 ; Saibene et al. 1985 ; Tesch 1995 ; Burtscher et al. 2000 ; Polat 2016). Des valeurs de $\dot{V}O_{2pic}$ de 79 à 93% de $\dot{V}O_{2max}$ sont observées lors de GS de 60 à 82s (Tesch et al. 1978 ; Saibene et al. 1985 ; Rognmo et al. 2002). Les rares études *in situ* régulièrement citées dans la littérature ont été principalement

réalisées dans les années 1980 (Veicsteinas et al. 1984 ; Saibene et al. 1985) et ne représentent pas les caractéristiques actuelles du ski alpin de compétition. En effet, depuis les années 1980, l'équipement, la préparation des pistes et la réglementation ont connu d'importantes évolutions (Neumayr et al. 2003 ; Mueller et al. 2004 ; Karlsonn 2005 ; Kröll et al. 2009). Comme ces évolutions ont entraîné des changements au niveau des contraintes mécaniques (Supej et al. 2002 ; Kugovnik et al. 2003 ; Mueller et al. 2004), il est possible qu'elles aient également impacté les demandes métaboliques du skieur.

D'un autre côté, alors que le profil physiologique des skieurs alpins de haut niveau a été étudié (Eriksson et al. 1977 ; Rusko et al. 1978 ; Karlsson et al. 1978 ; Haymes et al. 1980 ; Brown et Wilkinson 1983 ; Veicsteinas et al. 1984 ; White et al. 1991 ; Tesch 1995 ; Neumayr et al. 2003 ; Impellizzeri et al. 2009 ; Breil et al. 2010 ; Zitoun-Florentin 2011 ; Vogt et Hoppeler 2012 ; Gross et al. 2015), la plupart des études s'appuient sur des données recueillies dans des conditions de laboratoire. Par exemple, Neumayr et al. (2003) et Zitoun-Florentin (2011) montrent une corrélation entre le niveau de puissance aérobie et le niveau de performance à ski. Ces résultats sont critiqués par Maffiuletti et al. (2006). En effet, les études menées en conditions de laboratoire présentent l'avantage d'évaluer les qualités physiques et physiologiques de larges cohortes de skieurs de haut niveau. Cependant, ces qualités ne sont pas nécessairement celles utilisées dans la pratique *in situ* du ski alpin. De plus, des tests non spécifiques du ski alpin menés en laboratoire ne fournissent pas nécessairement des informations fidèles quant à la part de contribution des systèmes énergétiques lors de la pratique écologique du ski alpin de compétition.

Par conséquent, les demandes métaboliques en GS sont toujours débattues, alors que les demandes métaboliques n'ont jamais été investiguées en SL. Les contraintes physiologiques du SL pourraient être différentes de celles du GS au regard des différences biomécaniques entre les deux disciplines au niveau de la fréquence de virage, de l'intensité et de la durée de la force de réaction du sol (Spörri et al. 2016), des angles et vitesses articulaires au niveau des membres inférieurs (Berg et Eiken 1999 ; Reid 2010). De plus, les rares études sur le métabolisme *in situ* du skieur alpin n'ont jamais pris en considération les différences intra-discipline de durées d'effort (jusqu'à 18s en SL et 28s en GS). Comme des différences métaboliques seraient observées entre deux efforts de durées différentes (Howald et al. 1978), les tracés courts et longs - caractéristiques des extrêmes rencontrés lors de compétitions - méritent d'être investigués pour chaque discipline en vue de rendre compte de la réalité physiologique des disciplines de SL et GS. En effet, les entraîneurs doivent fixer des objectifs énergétiques d'entraînement permettant de performer dans l'ensemble des situations de compétitions.

Pour résumer, on observe des lacunes dans la compréhension des demandes métaboliques en ski alpin: (i) il n'y a pas de réel consensus concernant les demandes métaboliques en GS; (ii) les demandes métaboliques n'ont pas encore été investiguées en SL; et, (iii) les différences de demandes métaboliques entre deux différentes durées d'effort dans une discipline n'ont pas été clarifiées. Par conséquent, une meilleure connaissance des contraintes énergétiques du ski alpin de compétition permettrait d'améliorer la pertinence des objectifs d'entraînement et des contenus d'entraînement. Ces facteurs pourraient améliorer les performances et diminuer le risque de blessure. **Le but de cette étude était d'investiguer les demandes physiologiques ($\dot{V}O_2$, [La], FC) et d'estimer la part de contribution des systèmes énergétiques (aérobie, glycolytique et phosphagène) au cours de différentes durées de GS et SL chez des skieurs alpins entraînés. Notre hypothèse était que la discipline (SL ou GS) et la durée d'effort (court ou long) produiraient des différences au niveau des demandes physiologiques.**

1.2 - Méthodes

1.2.1 - Procédure

Les sujets ont réalisé quatre tests de terrain séparés d'au moins 24h au cours d'une période de 8 jours durant la période hivernale. Ils réalisaient de manière randomisée 2 SL (SLCT et SLLG) et 2 GS (GSCT et GSLG), respectivement court (CT) et long (LG). Les durées courtes et longues d'effort étaient déterminées par les temps d'effort (le plus court et le plus long, respectivement) des vainqueurs de Coupe d'Europe et de Coupe du Monde au cours des deux saisons précédentes (Figure 2.2). En effet, le temps d'effort en compétition dépend de la longueur et de la pente de la piste, des écarts verticaux et latéraux entre les portes et de la météorologie pouvant abaisser le départ initialement prévu (par exemple lorsque le sommet du tracé est trop venté ou dans le brouillard). Ces paramètres expliquent les importants écarts de temps d'effort caractéristiques des épreuves de SL et en particulier des épreuves de GS plus sensibles encore aux aléas climatiques. Ce dernier point explique la plus grande fourchette de temps d'effort observée en GS par rapport au SL.

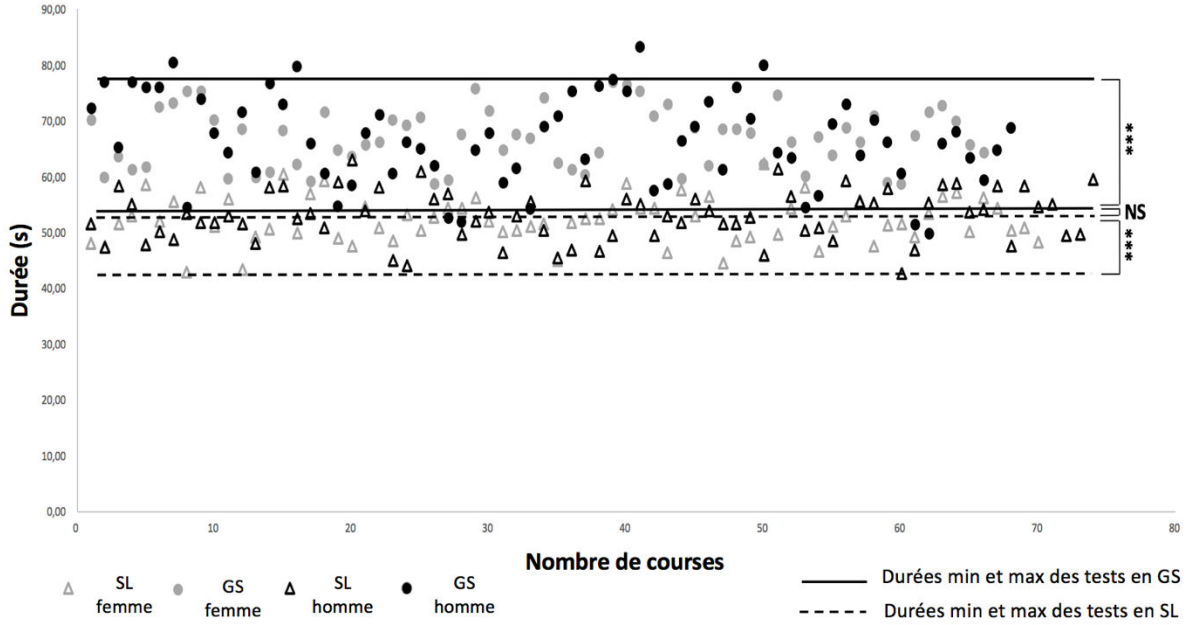


Figure 2.2 - Temps de course des vainqueurs de Coupe du Monde et Coupe d'Europe au cours des 2 dernières saisons

SL: slalom ; GS: slalom géant.

*** : différence significative entre les durées de tests. $p < 0,001$; NS: aucune différence significative entre les durées de tests.

1.3 - Résultats

1.3.1 - Test d'effort maximal

$\dot{V}O_{2max}$, FC_{max} et PMA était respectivement de 57,9 ± 6,7mL.min^{-1}.kg^{-1} (95% IC: 52,3-63,5), 197 ± 4bpm (95% IC: 194-200) et 290,6 ± 68,3W (95% IC: 233,5-347,7).

1.3.2 - Durées d'effort *in situ*

SLCT, SLLG, GSCT et GSLG duraient respectivement 43,87 ± 3,87s, 52,94 ± 2,96s, 53,18 ± 1,02s et 78,35 ± 1,41s (Tableau 2.1). Nos résultats montrent une différence significative de durée d'effort entre SLCT et SLLG ($p < 0,001$; + 20,7%; $d = 1,6$; ES: large; SLCT 95% IC: 40,63-47,11s; SLLG 95% IC: 50,47-55,41s), ainsi qu'entre GSCT et GSLG ($p < 0,001$; + 47,3%; $d = 1.9$; ES: large; GSCT 95% IC: 52,33-54,03s; GSLG 95% IC: 77,17-79,53s). En revanche, aucune différence significative de durée d'effort n'est observée entre SLLG et GSCT.

1.3.3 - Concentration sanguine en acide lactique

Les valeurs de $[La]_{pre}$ n'étaient pas significativement différentes entre les 4 tests

(Tableau 2.1). Les valeurs de $[La]_{pic}$ (Tableau 2.1) mesurées post SLCT (10,21 ± 2,63mmol.L^{-1}) et SLLG (11,10 ± 2,41mmol.L^{-1}) n'étaient pas significativement différentes. En revanche, on observait une différence significative ($p < 0,05$; + 34,2%; d = 1,1; ES: modérée) de $[La]_{pic}$ entre GSCT (8,01 ± 2,01mmol.L^{-1}) et GSLG (10,75 ± 2,02mmol.L^{-1}). $[La]_{pic}$ était significativement inférieure ($p < 0,01$; + 38,5%; d = 1,2; ES: modérée) post GSCT par rapport au SLLG.

1.3.4 - Contribution des filières énergétiques au débit énergétique

La figure 2.3 montre la contribution des systèmes aérobie, glycolytique et des phosphagènes à la production d'énergie lors de SLCT, SLLG, GSCT et GSLG. Le système aérobie est la source principale d'énergie au cours de GSCT ($p < 0,001$; + 65,4%; d = 1,6; ES: large et $p < 0,001$; + 48,6%; d = 1,7; ES: large) et GSLG ($p < 0,001$; + 62,2%; d = 1,8; ES: large et $p < 0,001$; + 114,3%; d = 1,9; ES: large) par rapport respectivement au système glycolytique et à celui des phosphagènes. Le système des phosphagènes représente la plus faible source d'énergie au cours de SLLG ($p < 0,001$; + 56,4%; d = 1,7; ES: large et $p < 0,01$; + 15,3%; d = 1,4; ES: large) et de GSLG ($p < 0,001$; + 124,4%; d = 1,9; ES: large et $p < 0,001$; + 38,3%; d = 1,6; ES: large) par rapport aux systèmes aérobie et glycolytique. Aucune différence de contribution à la production d'énergie n'est observée au cours de SLCT.

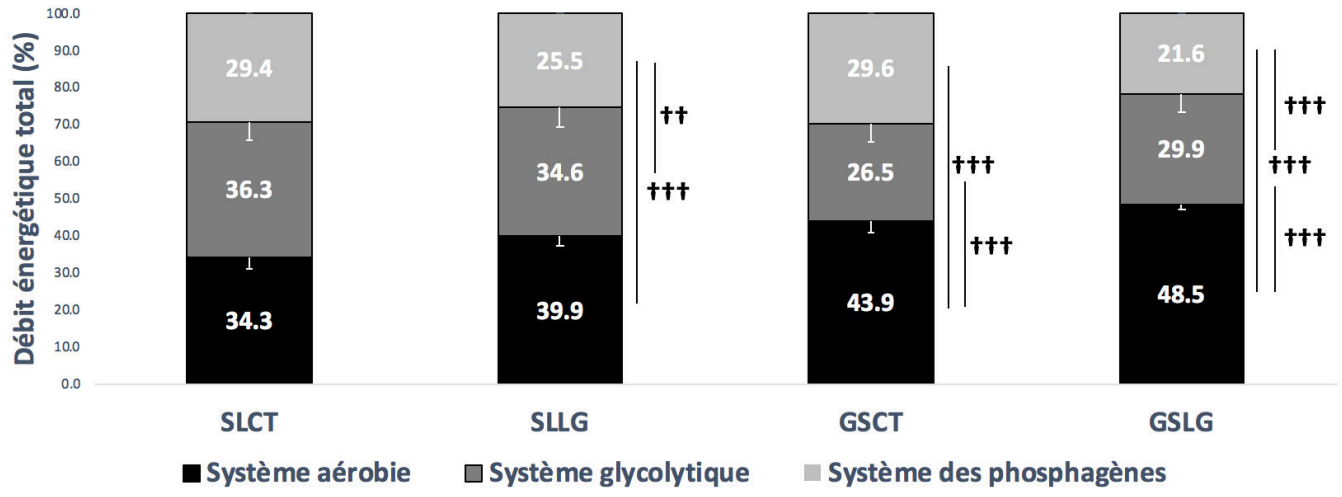


Figure 2.3 - Part de contribution des métabolismes aérobie, glycolytique et des phosphagènes sur le débit énergétique total au cours de SLCT, SLLG, GSCT et GSLG

SLCT: slalom court ; SLLG: slalom long ; GSCT: slalom géant court ; GSLG: slalom géant long.
† : différence significative de contribution des systèmes énergétiques au sein d'un test. ††$p < 0,01$; †††$p < 0,001$.

La Figure 2.4 présente les débits énergétiques totaux, aérobie, glycolytique et phosphagène au cours de SLCT, SLLG, GSCT et GSLG. Les débits énergétiques totaux étaient significativement différents entre SLCT et GSLG ($p < 0,05$; + 31,9%; d = 1,1; ES: modéré ; SLCT 95% IC: 107,9-149,7kJ.min^{-1}; GSLG 95% IC: 81,0-114,2kJ.min^{-1}) et entre SLLG et GSLG ($p < 0,05$; + 25,2%; d = 1,0; ES: modéré; SLLG 95% IC: 105,6-138,8kJ.min^{-1}). Aucune différence significative de débit énergétique aérobie n'était observée entre SLCT, SLLG, GSCT et GSLG. Le débit énergétique glycolytique était significativement inférieur lors du GSCT (95% IC: 20,5-34,9kJ.min^{-1}) par rapport à SLCT ($p < 0,01$; + 69,1%; d = 1,2; ES: large; 95% IC: 33,9-59,7kJ.min^{-1}) et SLLG ($p < 0,01$; + 50,1%; d = 1,3; ES: large; 95% IC: 35,7-47,5kJ.min^{-1}). Le débit énergétique glycolytique était significativement inférieur lors de GSLG (95% IC: 23,4-35,0kJ.min^{-1}) par rapport à SLCT ($p < 0,05$; + 60,6%; d = 1,2; ES: large) et SLLG ($p < 0,01$; + 42,6%; d = 1,3; ES: large). Le débit énergétique du système des phosphagènes était significativement inférieur lors de GSLG (95% IC: 17,6-24,4kJ.min^{-1}) par rapport à SLCT ($p < 0,001$; + 81,1%; d = 1,5; ES: large; 95% IC: 30,1-45,9kJ.min^{-1}), SLLG ($p < 0,01$; + 49,1%; d = 1,3; ES: large; 95% IC: 25,3-37,3kJ.min^{-1}) et GSCT ($p < 0,01$; + 47,2%; d = 1,4; ES: large; 95% IC: 26,0-35,8kJ.min^{-1}).

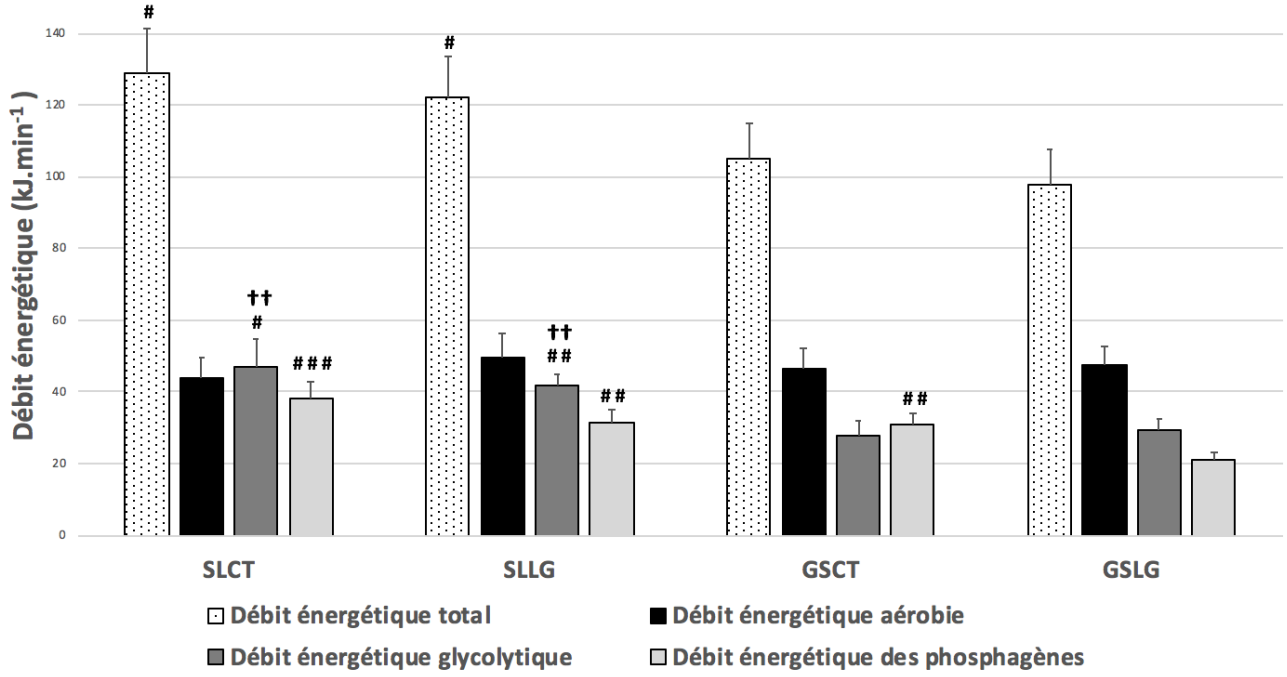


Figure 2.4 - Débit énergétique total, aérobie, glycolytique et des phosphagènes au cours de SLCT, SLLG, GSCT et GSLG

SLCT: slalom court ; SLLG: slalom long ; GSCT: slalom géant court ; GSLG: slalom géant long.

† : différence significative par rapport au GSCT: $^{††}p < 0,01$.

: différence significative par rapport au GSLG: $^{\#}p < 0,05$; $^{\#\#}p < 0,01$; $^{\#\#\#}p < 0,001$.

1.3.5 - Paramètres cardio-respiratoires

La Figure 2.6 présente $\dot{V}O_{2moy\ 5s}$, exprimée en pourcentage de $\dot{V}O_{2max}$, au cours de SLCT, SLLG, GSCT et GSLG. De 55s d'effort jusqu'à la fin du GSLG, $\dot{V}O_2$ restait constante. Aucune différence significative de $\dot{V}O_{2moy\ 5s}$ n'était observée entre GSCT et GSLG. De 0s à 10s, des différences significatives de $\dot{V}O_{2moy\ 5s}$ étaient observées entre SLCT et SLLG ($p < 0,05$) ce qui n'était pas le cas de 10s à 45s d'effort. $\dot{V}O_{2moy\ 5s}$ était significativement plus élevée au cours de SLLG par rapport au GSCT entre 25s et 30s et au durant les dernières 5s d'effort ($p < 0,05$).

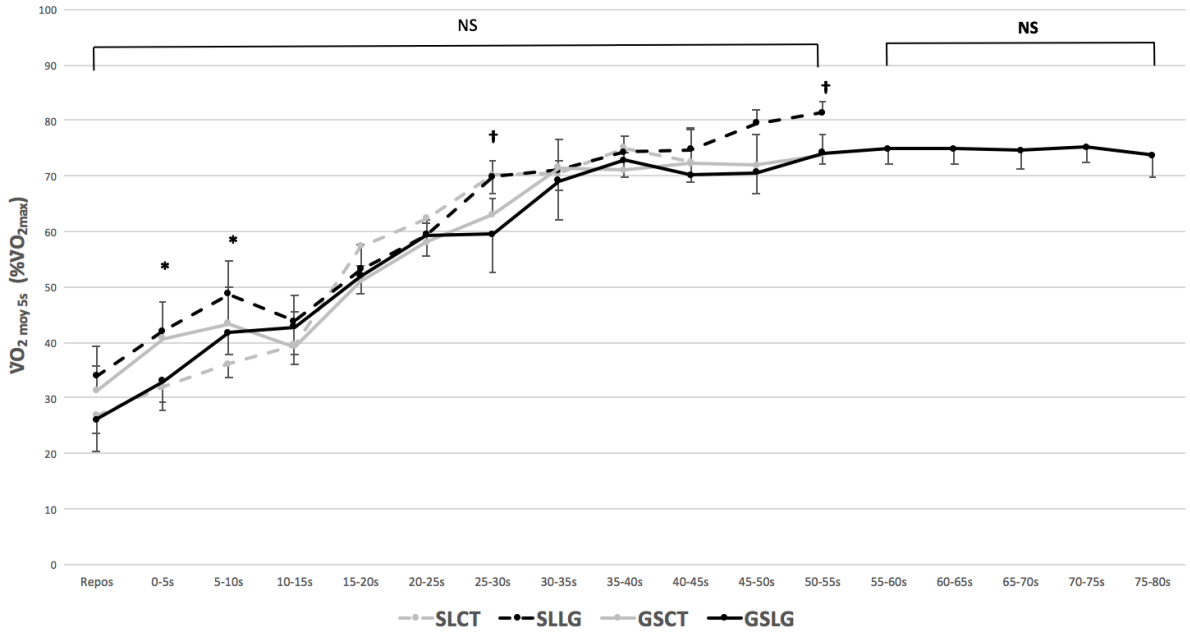


Figure 2.6 - $\dot{V}O_2$ moyennées toutes les 5s au cours de SLCT, SLLG, GSCT et GSLG

$\dot{V}O_{2\ moy\ 5s}$: consommation d'oxygène moyennée sur 5s ; SLCT: slalom court ; SLLG: slalom long ; GSCT: slalom géant court ; GSLG: slalom géant long.
* : différence significative de $\dot{V}O_{2\ moy\ 5s}$ entre SLCT et SLLG. $^{*}p < 0,05$.
† : différence significative de $\dot{V}O_{2\ moy\ 5s}$ entre SLLG et GSCT. $^{\dagger}p < 0,05$.
NS: aucune différence significative de $\dot{V}O_{2\ moy\ 5s}$ entre GSCT et GSLG.
NS: aucune différence significative de $\dot{V}O_{2\ moy\ 5s}$ au cours de GSLG.

$\dot{V}O_{2pic}$ présentait des différences significatives ($p < 0,05$; + 8,9%; d = 1,0; ES: modérée) entre SLCT (95% IC: 71,7-82,1%) et SLLG (95% IC: 78,9-88,5%). Nos résultats ne montraient aucune différence significative de $\dot{V}O_{2pic}$ entre GSCT et GSLG et entre SLLG et GSCT (Tableau 2.1). $FC_{départ}$ et FC_{pic} ne présentaient aucune différence significative entre SLCT et SLLG, GSCT et GSLG, et SLLG et GSCT (Tableau 2.1). FC_{pic} était significativement plus élevée au cours de GSLG (95% IC: 95,1-97,7%) par rapport à SLCT ($p < 0,05$; + 2,2%; d =

1,1; ES: modérée; 95% IC: 93,2-95,8%). Enfin, les valeurs de QR_{moy} étaient supérieures à 1,1. Il n'y avait aucune différence de QR_{moy} entre SLCT, SLLG, GSCT et GSLG (Tableau 2.1).

Paramètres	SLCT	SLLG	GSCT	GSLG
Durée du slalom	$43,87^{***, ††, ###}$	$52,94^{###}$	$53,18^{###}$	$78,35^{***}$
(s)	(3,87)	(2,96)	(1,02)	(1,41)
$\dot{V}O_{2pic}$	$76,9^{*}$	83,7	77,6	80,9
(%$\dot{V}O_{2max}$)	(6,2)	(5,8)	(10,6)	(11,0)
QR_{mean}	1,15	1,12	1,12	1,15
	(0,10)	(0,10)	(0,08)	(0,12)
$FC_{départ}$	73,3	72,5	69,7	71,1
(% FC_{max})	(7,3)	(6,5)	(10,5)	(7,2)
FC_{moy}	$87,4^{\#}$	$86,3^{\#}$	87,0	90,3
(% FC_{max})	(2,6)	(3,3)	(4,9)	(2,3)
FC_{pic}	$94,5^{\#}$	94,3	94,1	96,4
(% FC_{max})	(1,6)	(3,1)	(3,5)	(1,6)
$[La]_{pre}$	1,8	1,9	2,0	1,5
($mmol.L^{-1}$)	(0,4)	(0,4)	(0,9)	(0,4)
$[La]_{pic}$	10,2	$11,1^{†}$	8,0	$10,8^{†}$
($mmol.L^{-1}$)	(2,6)	(2,4)	(2,0)	(2,0)
Δ[La]	8,5	$9,2^{†}$	$6,0^{\#\#}$	9,3
($mmol.L^{-1}$)	(3,0)	(2,4)	(1,9)	(1,8)
RPE	$14,0^{\#\#}$	$15,4^{††}$	$13,4^{###}$	15,9
	(1,3)	(1,4)	(0,7)	(1,0)

Tableau 2.1 - Moyennes (± ET) des variables mesurées au cours de SLCT, SLLG, GSCT et GSLG

SLCT: slalom court ; SLLG: slalom long ; GSCT: slalom géant court ; GSLG: slalom géant long ; $\dot{V}O_{2pic}$: consommation d'oxygène pic ; QR_{moy}: quotient respiratoire moyen ; $FC_{départ}$: fréquence cardiaque au départ ; FC_{pic}: fréquence cardiaque pic ; $[La]_{pre}$: concentration sanguine en acide lactique au départ; Δ[La]: différence de concentration sanguine en acide lactique entre celle mesurée au départ et celle mesurée durant la récupération ; RPE : difficulté perçue de l'effort.

* : différence significative par rapport à SLLG: $^{*}p < 0,05$; $^{***}p < 0,001$.

† : différence significative par rapport à GSCT: $^{\dagger}p < 0,05$; $^{\dagger\dagger}p < 0,01$.

: différence significative par rapport à GSLG: $^{\#}p < 0,05$; $^{\#\#}p < 0,01$; $^{\#\#\#}p < 0,001$.

1.3.6 - Difficulté d'effort perçue

Les valeurs de RPE étaient de 14,0 ± 1,3 pour le SLCT, 15,4 ± 1,4 pour le SLLG, 13,4 ± 0,7 pour le GSCT et 15,9 ± 1,0 pour le GSLG (Tableau 2.1). RPE était significativement plus élevée pour le GSLG (95% IC: 15,1-16,7) par rapport au GSCT ($p < 0,001$; + 18,7%; d = 1,6; ES: large; 95% IC: 12,8-14,0) et au SLCT ($p < 0,01$; + 13,4%; d = 1,3; ES: large; 95% IC: 12,9-15,1). RPE était significativement plus élevée ($p < 0,01$; + 15,0%; d = 1,3; ES: large) pour le SLLG (95% IC: 14,2-16,6) par rapport au GSCT. Aucune autre différence significative de RPE n'était observée.

2 - Etude n°2 : Motricités spécifiques des demandes physiologiques du ski alpin *in situ*

Bottollier V, Coulmy N, Cross MR, Le Quellec L, Prioux J.

Motor skills specific to field alpine ski racing physiological demands.

Journal of Strength and Conditioning Research.
(Article en soumission)

2.1 - Introduction

Le temps effectif de pratique est particulièrement court lors d'une session d'entraînement de ski alpin. De plus, les sessions d'entraînement sur les skis se raréfient pour des raisons climatiques, organisationnelles et financières. Ainsi, l'entraînement hors neige des skieurs alpins revêt une importance particulière (Tesch 1995; Raschner et al. 1997). En conséquence, les entraîneurs ont besoin de trouver des formes de travail spécifiques du ski alpin pour développer les qualités nécessaires à la performance du skieur, notamment au niveau des aspects physiologiques.

Très peu d'études ont mis en avant des motricités spécifiques du ski alpin sur le plan physiologique. Néanmoins, Gross et al. (2014) ont montré que le métabolisme aérobie jouait un rôle clé dans le débit énergétique total (63,3 ± 2,8%) lors du 90s Box test chez des skieurs de haut niveau. Des contributions similaires du système aérobie (60-70%) ont été montrées lors de GS de 72-76s (Burtscher et al. 2000; Grenier et al. 2012). Ces similarités pourraient laisser penser que les demandes énergétiques du 90s Box test sont spécifiques du GS. De plus, la course à pied et le cyclisme seraient également spécifiques des contraintes physiologiques du ski alpin dans la mesure où ces motricités sont les plus utilisées dans le cadre des tests physiques et de la préparation physique des skieurs alpins (Haymes et Dickinson 1980; White et Johnson 1991). Toutefois, en comparaison au GS (Burtscher et al. 2000; Grenier et al. 2012), 49-60s de course à pied (Duffield et al. 2005 ; Hill et al. 1999 ; Zouhal et al. 2010 ; Spencer et al. 1996 ; Medbo et al. 1985 ; Nummela et al. 1995) et de cyclisme (Craig et Norton 2001) montrent une contribution supérieure du système anaérobie lactique dans la production d'énergie. Lorsqu'on les compare aux résultats des études menées en ski alpin *in situ*, les données relatives à

l'implication des systèmes énergétiques lors du 90s Box test, de la course à pied et du cyclisme émanent (i) de différents sujets et (ii) impliquent des durées d'efforts différentes. Ces données ne permettent donc pas de conclure quant à la spécificité du 90s Box test et à la non spécificité de la course à pied et du cyclisme par rapport aux contraintes physiologiques du GS.

Par ailleurs, les motricités du slide et des bonds latéraux sur trampoline sont également largement utilisées dans le cadre de la préparation physique des skieurs alpins. Baum et al. (1997) montrent la spécificité des caractéristiques biomécaniques du slide par rapport au ski alpin. De même, ces auteurs montrent des similarités entre le slide, le SL et le GS (Berg et Eiken 1999 ; Szmedra et al. 2001) au niveau de la fréquence de changement de direction et des angles de l'articulation du genou. Toutefois, à notre connaissance, aucune étude n'a investigué les contraintes physiologiques de ces motricités lors d'efforts rectangulaires afin d'appréhender leur potentielle spécificité physiologique au ski alpin.

De plus, il serait également intéressant de comparer l'ensemble de ces rares données aux contraintes physiologiques du SL. En effet, les demandes métaboliques du SL pourraient différer de celles du GS au regard des différences biomécaniques (Berg et al. 1999; Sporri et al. 2012) et de durée d'effort caractérisant les deux disciplines. Toutefois, les contraintes physiologiques du SL n'ont jamais été étudiées. Finalement, la plupart des études ont seulement comparé les résultats de tests menés en laboratoire avec le niveau des skieurs (Haymes et al. 1980 ; McGinnis 1981 ; Song 1982 ; Shea 1983 ; Brown et Wilkinson 1983 ; Bosco et al. 1983, 1994, 1996; Vandewalle et al. 1987 ; Piper et al. 1987 ; Andersen et al. 1990 ; White et Johnson 1991 ; Abe et al. 1992 ; Reid et al. 1996; Neumayr et al. 2003 ; Platzer et al. 2006 ; Turnbull et al. 2009 ; Zitoun-Florentin 2011 ; Vogt et Hoppeler 2012). Pourtant, les tests de laboratoire ne permettent pas de fournir des informations précises quant à la spécificité physiologique au ski alpin des motricités mises en œuvre. La spécificité physiologique d'un test ne peut être démontrée qu'en comparant les variables physiologiques entre le ski alpin *in situ* et les motricités potentiellement spécifiques, sur un temps d'effort donné.

Améliorer la connaissance des motricités spécifiques du ski alpin permettrait de développer et d'utiliser des méthodes spécifiques d'entraînement ciblant le développement des systèmes aérobie, glycolytique ainsi que celui des phosphagènes. Cela permettrait d'améliorer la spécificité de l'entraînement physique par rapport aux contraintes du ski alpin de compétition et d'établir la validité d'une motricité lors d'un test physique spécifique de la discipline. **Par conséquent, le but de cette étude était de comparer, chez des skieurs alpins entraînés, les demandes physiologiques ($\dot{V}O_2$, [La], FC, contribution des systèmes énergétiques (aérobie et anaérobie lactique)) entre le ski alpin *in situ* (SL et GS) et différentes motricités (slide,**

bonds latéraux sur trampoline, bonds latéraux sur box, course à pied, cyclisme,) pour une durée d'effort identique. Notre hypothèse était que le slide, les bonds latéraux sur box et les bonds latéraux sur trampoline seraient spécifiques des contraintes physiologiques du SL et du GS, et que ça ne serait pas le cas pour la course à pied et le cyclisme.

2.2 - Méthodes

2.2.1 - Procédure

L'étude 2 s'inscrit dans la continuité de l'étude 1, avec la même population. Les sujets ont réalisé deux tests de terrain à ski, séparés de 24h minimum au cours d'une période de 8 jours pendant la saison hivernale. Les sujets ont réalisé de manière randomisée un GS de 53s et un SL de 53s. Trois à cinq jours après les tests de terrain, les sujets réalisaient un test d'effort maximal et incrémental sur ergocycle en laboratoire afin de déterminer leur $\dot{V}O_{2max}$. Deux jours après le test d'effort maximal, les sujets réalisaient de manière randomisée cinq tests (slide, bonds latéraux sur trampoline, bonds latéraux sur box, course à pied, cyclisme) à intensité maximale utilisant cinq motricités différentes lors de cinq sessions expérimentales séparées d'au minimum 24h. Ces tests étaient réalisés à la même altitude que le test d'effort maximal sur ergocycle. Les mesures effectuées étaient identiques à celles réalisées lors des tests de terrain à ski. Tous les sujets étaient familiers avec ces tests. Les sujets visitaient au préalable le laboratoire pour une session de familiarisation avec le matériel expérimental.

2.2.2- Motricités testées durant 53s à intensité maximale

Les cinq tests maximaux de 53s concernaient les motricités suivantes: slide, bonds latéraux sur trampoline, bonds latéraux au-dessus d'une box, course à pied et cyclisme. L'expérimentateur donnait le signal sonore du début, des 10 dernières secondes et de la fin du test. Le slide test était réalisé sur une planche de slide de 8 pieds (Ultraslide, Northbrook, US) chaussé de sur-chaussures adaptées (Ultraslide, Northbrook, US) par-dessus les chaussures de course à pied personnelles des sujets (Baum et al. 1997 ; Piucco et al. 2015, 2016, 2017). Le test de bonds latéraux sur trampoline était réalisé de part et d'autre d'un couloir de 80cm matérialisé au centre du trampoline olympique (Gymnova, Marseille, France). Les bonds latéraux sur box consistaient à réaliser le plus de traversées de box pieds joints en touchant le sommet de la box à chaque passage. La box mesurait 40cm de haut, 51cm de large et 60cm de long (McGinnis 1981 ; Gross et al. 2014). Le test de course à pied était réalisé sur une piste d'athlétisme de 350m en extérieur. Ce test n'était pas réalisé, ou était arrêté, en cas de pluie et

de vitesse de vent supérieure à 15km.h^{-1}. Enfin, le test de cyclisme était réalisé sur bicyclette ergométrique (Wattbike, Colombes, France). Lors de ces tests, il était demandé aux sujets de réaliser le plus grand nombre d'appuis glissés latéraux, le plus grand nombre de bonds latéraux, de parcourir la plus grande distance possible et de développer la puissance moyenne la plus importante, respectivement pour le slide test, le test de bonds latéraux sur trampoline, les bonds latéraux sur box, le test de course à pied et le test de cyclisme.

2.3 - Résultats

2.3.1 - Test d'effort maximal

$\dot{V}O_{2max}$, FC_{max} et PMA était respectivement égales à 57,9 ± 6,7mL.min^{-1}.kg^{-1}, 197 ± 4bpm et 290,6 ± 68,3W.

2.3.2 - Contribution des filières énergétiques à la production d'énergie

Aucune différence significative n'était observée au niveau (i) de la contribution du système aérobie entre SL ou GS et le slide, les bonds latéraux sur box ou la course à pied (Figure 2.7), (ii) de la contribution du système glycolytique entre SL ou GS et le slide ou les bonds latéraux sur trampoline ; et (iii) de la contribution du système des phosphagènes entre SL et le slide ou les bonds latéraux sur trampoline. La contribution du système des phosphagènes à la production d'énergie était supérieure lors du GS par rapport au slide ($p < 0,01$; + 15,1%; d = 1,3; ES: large) et aux bonds latéraux sur trampoline ($p < 0,01$; + 15,1%; d = 1,3; ES: large).

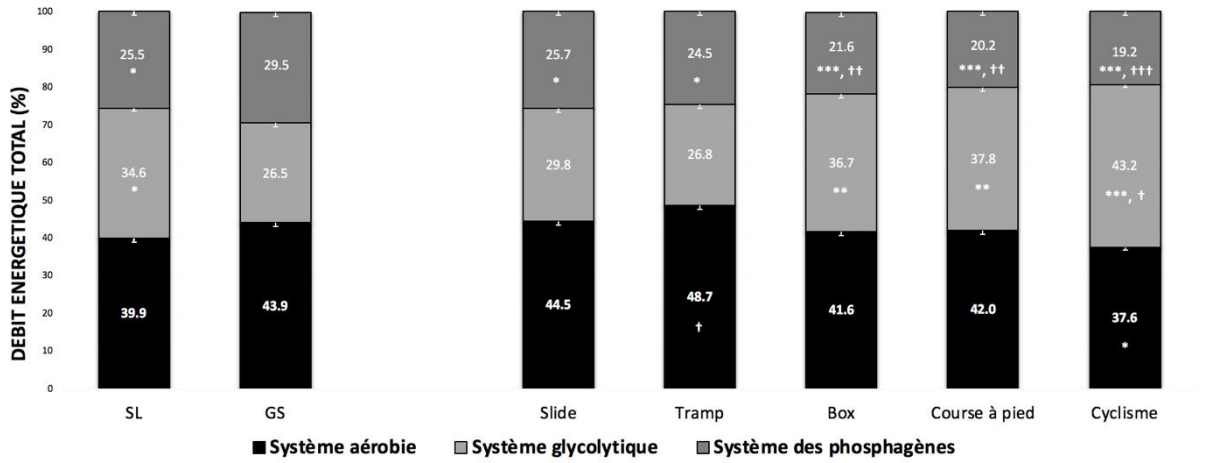


Figure 2.7 - Part de contribution des métabolismes anaérobie lactique et aérobie sur le débit énergétique total au cours de SL, GS, slide, bonds latéraux sur trampoline, bonds latéraux du box test, course à pied et cyclisme

SL: slalom ; GS: slalom géant ; Tramp: bonds latéraux sur trampoline ; Box: bonds latéraux du box test.

* : différence significative par rapport au GS: *p < 0,05; **p < 0,01; ***p < 0,001.
† : différence significative par rapport au SL: †*p* < 0,05; ††*p* < 0,01; †††*p* < 0,001.

2.3.3 - Débit énergétique

Aucune différence de débit énergétique total n'est observée entre SL ou GS et le slide (Figure 2.8). Le débits énergétiques totaux en course à pied (p < 0,01; + 25,8%; d = 1,1; ES: modéré) et en cyclisme (p < 0,05; + 33,2%; d = 1,1; ES: modéré) étaient supérieurs au SL. Les débits énergétique totaux au cours des bonds latéraux sur trampoline (p < 0,05; + 22,2%; d = 0,9; ES: modéré), des bonds latéraux sur box (p < 0,01; + 20,7%; d = 1,6; ES: large), de la course à pied (p < 0,001; + 38,6%; d = 1,2; ES: modéré) et du cyclisme (p < 0,01; + 55,4%; d = 1,4; ES: large) étaient supérieurs à celui du GS.

Ensuite, aucune différence significative de débit énergétique glycolytique n'était observée entre SL ou GS et le slide et les bonds latéraux sur trampoline (Figure 2.8). Le débit énergétique glycolytique lors des bonds latéraux sur box (p < 0,05; + 28,7%; d = 1,0; ES: modéré), de la course à pied (p < 0,01; + 38,6%; d = 1,2; ES: large) et du cyclisme (p < 0,01; + 70,2%; d = 1,4; ES: large) était significativement plus élevé que lors du SL. Le débit énergétique glycolytique lors des bonds sur box (p < 0,01; + 93,1%; d = 1,5; ES: large), de la course à pied (p < 0,001; + 108,0%; d = 1,6; ES: large) et du cyclisme (p < 0,001; + 155,5%; d = 1,6; ES: large) était significativement plus élevé que lors du GS.

Enfin, aucune différence de débit énergétique aérobie n'était observée entre SL ou GS et le slide (Figure 2.8). Le débit énergétique aérobie était supérieur en course à pied (p < 0,05; + 32,1%; d = 0,9; ES: modéré) par rapport au SL. Le débit énergétique aérobie était supérieur en bonds latéraux sur trampoline (p < 0,05; + 34,7%; d = 1,0; ES: modéré), bonds latéraux sur box (p < 0,05; + 31,6%; d = 0,9; ES: modéré), course à pied (p < 0,05; + 41,2%; d = 1,1; ES: modéré) et cyclisme (p < 0,05; + 32,3%; d = 1,0; ES: modéré) par rapport au GS.

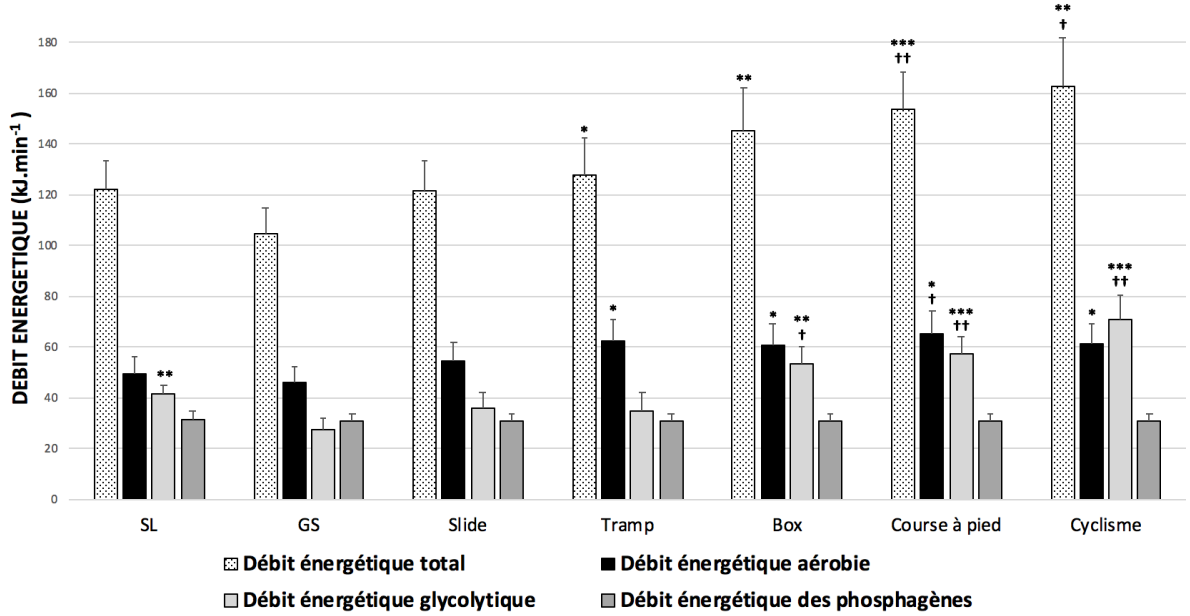


Figure 2.8 - Débit énergétique total, aérobie, glycolytique et des phosphagènes au cours de SL, GS, slide, bonds latéraux sur trampoline, bonds latéraux sur box, course à pied et cyclisme

SL: slalom ; GS: slalom géant ; Tramp: bonds latéraux sur trampoline; Box: bonds latéraux sur box.
† : différence significative par rapport au GS: $^{\dagger}p < 0,05$; $^{\dagger\dagger}p < 0,01$; $^{\dagger\dagger\dagger}p < 0,001$.
* : différence significative par rapport au SL: $^{*}p < 0,05$; $^{**}p < 0,01$.

2.3.4 - Paramètres cardio-respiratoires

Les valeurs de VO_{2pic} (Tableau 2.2) étaient significativement supérieures en slide ($p < 0,01$; + 117,4%; d = 1,5; ES: large), bonds latéraux sur trampoline ($p < 0,001$; + 124,6%; d = 1,7; ES: large), bonds latéraux sur box ($p < 0,001$; + 125,9%; d = 1,8; ES: large), course à pied ($p < 0,001$; + 122,0%; d = 1,6; ES: large) et cyclisme ($p < 0,001$; + 119,2%; d = 1,5; ES: large) par rapport au SL.

Les valeurs de VO_{2pic} étaient significativement supérieures en slide ($p < 0,01$; + 129,5%; d = 1,5; ES: large), bonds latéraux sur trampoline ($p < 0,001$; + 137,4%; d = 1,6; ES: large), bonds latéraux sur box ($p < 0,001$; + 138,9%; d = 1,7; ES: large), course à pied ($p < 0,001$; + 134,6%; d = 1,6; ES: large) et cyclisme ($p < 0,001$; + 131,5%; d = 1,5; ES: large) par rapport au SL.

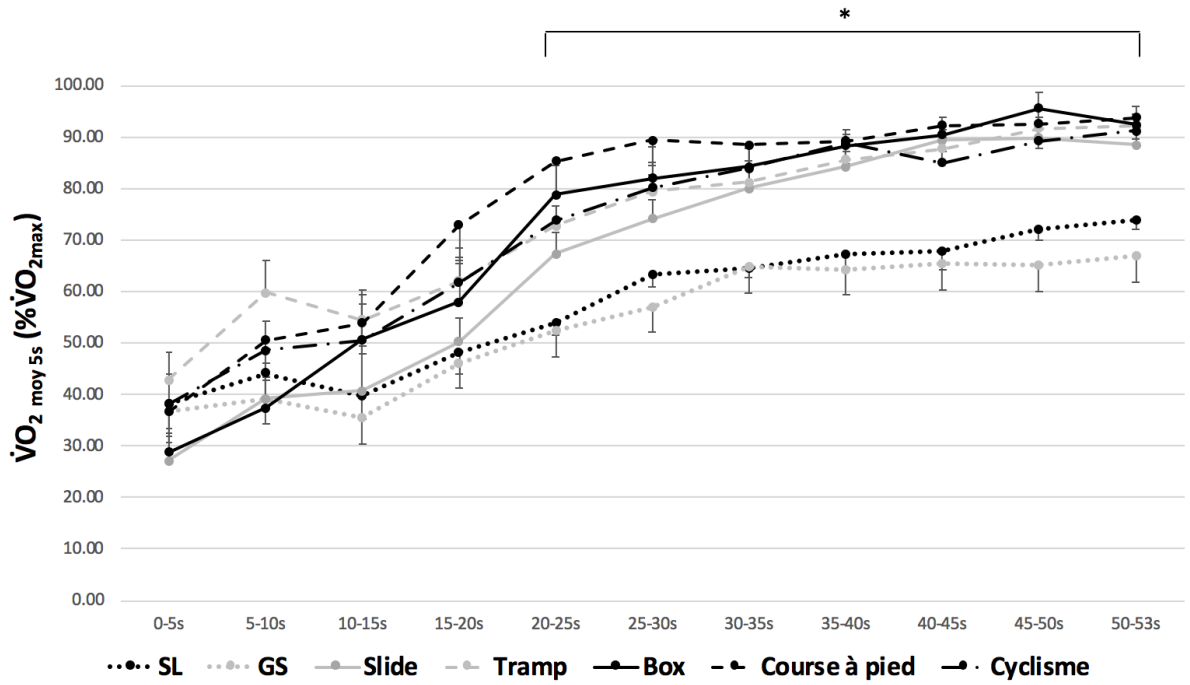


Figure 2.9 - $\dot{V}O_2$ moyennées toutes les 5s au cours de SL, GS, slide, bonds latéraux sur trampoline, bonds latéraux sur box, course à pied et cyclisme

$\dot{V}O_{2moy\ 5s}$: consommation d'oxygène moyennée sur 5s ; SL: slalom ; GS: slalom géant ; Tramp: bonds latéraux sur trampoline; Box: bonds latéraux sur box.

* : différence significative par rapport à SL et GS: $^{*}p < 0,05$.

Paramètres	SL	GS	Slide	Tramp	Box	Course à pied	Cyclisme
$\dot{V}O_{2pic}$	83,7	77,6	$89,1^{**,\dagger\dagger,b}$	$94,6^{***,\dagger\dagger\dagger}$	$95,6^{***,\dagger\dagger\dagger}$	$92,7^{***,\dagger\dagger\dagger}$	$90,5^{***,\dagger\dagger\dagger}$
($\%\dot{V}O_{2max}$)	(5,8)	(10,6)	(6,8)	(5,8)	(2,9)	(6,8)	(6,6)
FC_{moy}	86,3	87,0	82,4	86,2	85,1	$89,3^{b,s}$	85,7
(% FC_{max})	(3,3)	(4,9)	(6,3)	(3,4)	(2,6)	(2,8)	(3,9)
FC_{pic}	94,3	94,1	92,9	93,5	94,4	95,6	94,2
(% FC_{max})	(3,1)	(3,5)	(4,4)	(2,5)	(1,5)	(2,6)	(2,1)
$[La]_{pre}$	1,9	2,0	2,4	2,5	$3,3^{*}$	$3,1^{*,\dagger}$	2,6
($mmol.L^{-1}$)	(0,4)	(0,9)	(0,7)	(1,4)	(1,6)	(0,8)	(1,2)
Δ[La]	9,2	$6,0^{*}$	$7,9^{c,p,b}$	$7,5^{c,p,b}$	$11,4^{\dagger\dagger\dagger,c}$	$12,6^{*,\dagger\dagger\dagger}$	$15,0^{***,\dagger\dagger\dagger}$
($mmol.L^{-1}$)	(2,4)	(1,9)	(2,7)	(3,3)	(2,0)	(3,0)	(2,4)

Tableau 2.2 - Moyenne (± ET) des variables mesurées au cours de SL, GS, slide, bonds latéraux sur trampoline, bonds latéraux sur box, course à pied et cyclisme

SL: slalom ; GS: slalom géant ; Tramp : bonds latéraux sur trampoline ; Box: bonds latéraux sur box ; $\dot{V}O_{2moy}$: consommation d'oxygène moyenne ; $\dot{V}O_{2pic}$: consommation d'oxygène pic ; FC_{moy}: fréquence cardiaque moyenne ; FC_{pic}: fréquence cardiaque pic ; $[La]_{pre}$: concentration sanguine en acide lactique au départ ; Δ[La]: différence de concentration sanguine en acide lactique entre celle mesurée au départ et celle mesurée durant la récupération.
* : différence significative par rapport au SL: $^{*}p < 0,05$; $^{**}p < 0,01$; $^{***}p < 0,001$.
† : différence significative par rapport au GS: $^{\dagger\dagger}p < 0,01$; $^{\dagger\dagger\dagger}p < 0,001$.
différence significative ($p < 0,05$) par rapport au Slide (^{s}), au bonds latéraux sur trampoline (^{t}), aux bonds latéraux sur box (^{b}), à la course à pied (^{p}) et au Cyclisme (^{c}).

2.3.5 - Concentration sanguine en acide lactique

La Figure 2.10 montre que $[La]_{pic}$ était significativement plus élevée ($p < 0,05$; + 38,5%; d = 1,2; ES: modéré) en SL par rapport au GS. Aucune différence significative de $[La]_{pic}$ (Figure 2.10) et de Δ[La] (Tableau 2.2) n'était observée entre les bonds latéraux sur trampoline, le slide test et GS et SL. $[La]_{pic}$ au cours des bonds latéraux sur box ($p < 0,01$; + 132,9%; d = 1,4; ES: large), course à pied ($p < 0,01$; + 141,1%; d = 1,2; ES: large) et cyclisme ($p < 0,001$; + 159,1%; d = 1,6; ES: large) était significativement supérieure à celle du SL. $[La]_{pic}$ au cours des bonds latéraux sur box ($p < 0,001$; + 184,1%; d = 1,8; ES: large), course à pied ($p < 0,001$; + 195,5%; d = 1,5; ES: large) et cyclisme ($p < 0,001$; + 220,4%; d = 1,8; ES: large) était significativement supérieure à celle du GS.

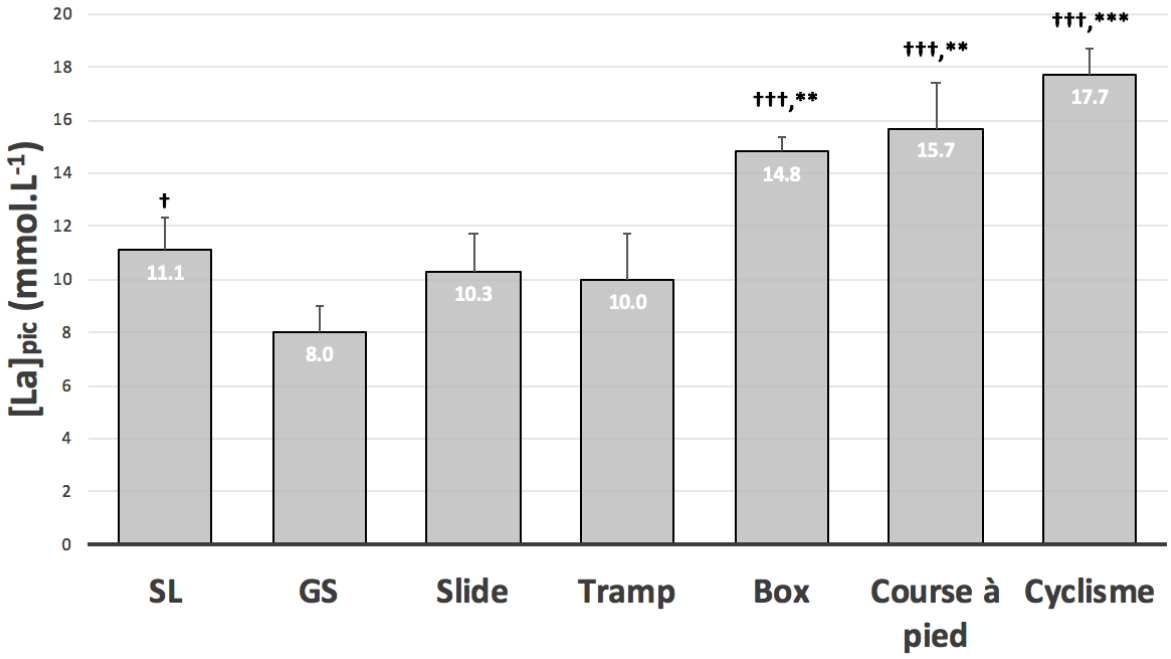


Figure 2.10 - Concentrations sanguines en acide lactique mesurée post SL, GS, slide, bonds latéraux sur trampoline, bonds latéraux sur box, course à pied et cyclisme

$[La]_{pic}$: concentration sanguine pic en acide lactique ; SL: slalom ; GS: slalom géant ; Tramp : bonds latéraux sur trampoline ; Box: bonds latéraux sur box.
† : différence significative par rapport au GS: $^{\dagger\dagger\dagger}p < 0,001$.
* : différence significative par rapport au SL: $^{**}p < 0,01$; $^{***}p < 0,001$.
Différence significative ($p < 0,05$) par rapport au Slide (^{s}), aux bonds latéraux sur trampoline (^{t}), aux bonds latéraux sur box (^{b}), à la course à pied (^{p}) et au Cyclisme (^{c}).

2.3.6 - Difficulté d'effort perçue

RPE était significativement supérieure ($p < 0,01$; + 15,0%; d = 1,3; ES: large) en SL par rapport au GS (Figure 2.11). Aucune différence de RPE n'était observée entre les bonds latéraux sur trampoline, le slide test et le GS, et entre la course à pied, les bonds latéraux sur box et le SL. RPE lors du slide ($p < 0,001$; - 11,8%; d = 1,1; ES: modéré) et des bonds latéraux sur trampoline ($p < 0,05$; - 21,2%; d = 1,4; ES: large) était significativement inférieure à celle du SL. RPE lors des bonds latéraux sur box ($p < 0,001$; + 20,6%; d = 1,5; ES: large), de la course à pied ($p < 0,001$; + 16,8%; d = 1,6; ES: large) et du cyclisme ($p < 0,001$; + 30,8%; d = 1,8; ES: large) était significativement supérieur à celle du GS.

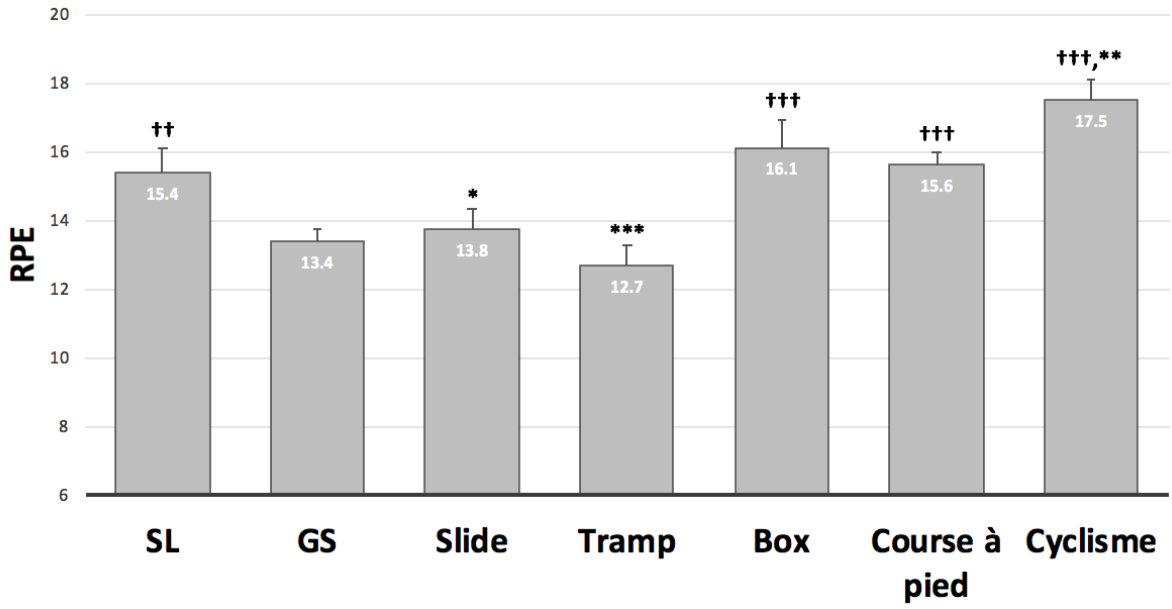


Figure 2.11 - Difficulté perçue de l'effort au cours de SL, GS, slide, bonds latéraux sur trampoline, bonds latéraux sur box, course à pied et cyclisme

RPE: difficulté perçue de l'effort ; SL: slalom ; GS: slalom géant ; Tramp: bonds latéraux sur trampoline ; Box: bonds latéraux sur box.
† : différence significative par rapport au GS: $^{\dagger\dagger}p < 0,01$; $^{\dagger\dagger\dagger}p < 0,001$.
* : différence significative par rapport au SL: $^{*}p < 0,05$; $^{**}p < 0,01$; $^{***}p < 0,001$.
Différence significative ($p < 0,05$) par rapport au Slide (^{s}), aux bonds latéraux sur trampoline (^{t}), aux bonds latéraux sur box (^{b}), à la course à pied (^{p}) et au Cyclisme (^{c}).

2.3.7 - Fréquence gestuelle

La durée moyenne de changement d'appuis était de 1,10 ± 0,06s en SL, 1,72 ± 0,03s en GS, 0,26 ± 0,01s en cyclisme, 0,29 ± 0,02s en course à pied, 0,75 ± 0,08s lors des bonds latéraux sur trampoline, 0,87 ± 0,13s lors des bonds latéraux sur box et 0,96 ± 0,17s en slide. La seule motricité dont la durée moyenne de changement d'appuis est non significativement différente du SL est le slide.

3 - Etude n°3 : Reproductibilité d'un test physique spécifique du ski alpin réalisé sur une planche de slide: le 80s-slide-test

---

Bottollier V, Cross MR, Coulmy N, Le Quellec L, Prioux J.

Reliability of alpine ski racing specific field test : the 80s-slide-test.

Journal of Strength and Conditioning Research.
(Article en soumission)

3.1 - Introduction

Les entraîneurs utilisent des tests physiques en vue d'améliorer les performances et de limiter le risque de blessure. Pour que ces tests soient pertinents, ils doivent être reproductibles et spécifiques de l'activité sur le plan physiologique (Hopkins et al. 2009). A notre connaissance, aucune étude n'a montré la reproductibilité d'un test physique spécifique du ski alpin. La plupart des études abordant des tests physiques potentiellement spécifiques du ski alpin ont uniquement établi des corrélations avec le niveau de performance des skieurs (Haymes et al. 1980 ; Brown et Wilkinson 1983 ; Bosco et al. 1983, White et Johnson 1991 ; Neumayr et al. 2003 ; Turnbull et al. 2009 ; Zitoun-Florentin 2011 ; Patterson et al. 2014). Toutefois, la spécificité physiologique d'une motricité en ski alpin ne peut être établie qu'en comparant ses caractéristiques physiologiques avec celles du contexte écologique du ski alpin. Bottollier et al. (en soumission à JSCR) ont pour la première fois montré la spécificité physiologique d'une motricité par rapport au ski alpin : le slide. En effet, les caractéristiques biomécaniques du slide sont spécifiques du ski alpin (Baum et al. 1997). Baum et al. montrent que, lors du slide, la fréquence de changement de direction ainsi que les angles articulaires de l'articulation du genou sont similaires par rapport au SL et GS (Berg et Eiken 1999 ; Szmedra et al. 2001). De plus, pour attester de la spécificité d'un test physique, Sheppard et al. (2006) suggèrent de ne pas inclure uniquement des paramètres physiologiques et biomécaniques mais également des paramètres perceptivo-décisionnelles. Comme en ski alpin, la motricité du slide sollicite des qualités perceptivo-décisionnels au niveau de la gestion des déséquilibres latéraux et sagittaux.

Par ailleurs, le slide est facilement utilisable sur le terrain ce qui est essentiel. Ainsi, la motricité du slide serait la plus pertinente pour constituer un test spécifique du ski alpin.

La reproductibilité du slide test a été validée lors d'un test maximal à charge croissante (triangulaire) chez des patineurs de vitesse (Piucco et al. 2015, 2016, 2017) et chez des skieurs alpins (Baum et al. 1997). Toutefois, aucune étude n'a investigué la reproductibilité du slide test lors d'un test à charge constante (rectangulaire) alors que c'est la seule manière d'attester de la spécificité physiologique d'un test par rapport aux caractéristiques de la compétition en ski alpin. Un test triangulaire mesure les qualités intrinsèques des athlètes, sans connaître la pertinence de ces qualités pour performer lors des compétitions de ski alpin. En revanche, un test spécifique rectangulaire permettrait de mesurer les qualités physiologiques spécifiquement sollicitées lors des situations de compétition en reproduisant les contraintes du ski alpin dans un autre contexte. 80s serait un temps d'effort pertinent dans la mesure où il correspond à la durée des GS les plus longs. En effet, le GS est souvent considéré comme la discipline médiane entre SL et DH (Saibene et al. 1985). De ce fait, le GS est la principale discipline investiguée sur le plan physiologique (Turnbull et al. 2009). Un test spécifique rectangulaire permettrait (i) d'objectiver les effets physiologiques spécifiques de l'entraînement au regard des contraintes compétitives, (ii) de monitorer de manière longitudinale l'état de forme des athlètes en vue d'éviter des épisodes de surmenage non fonctionnel, (iii) de fixer des repères avant la reprise du ski, lors de retour de blessure et (iv) d'établir des repères physiologiques lors du processus de détection. **Le but de cette étude était donc de déterminer la reproductibilité du 80s-slide-test en mesurant les paramètres physiologiques ($\dot{V}O_2$, [La] et FC), biomécaniques (nombre d'appuis total, index de fatigue) et perceptif (RPE) lors de trois tests chez des skieurs alpins entraînés. Notre hypothèse était que le 80s-slide-test était reproductible chez des skieurs alpins entraînés.**

3.2 - Méthodes

3.2.1 - Sujets

Huit skieurs alpins masculins entraînés (17,8 ± 0,7 ans, 1,80 ± 0,09 m et 72,1 ± 9,5 kg) ont volontairement participé à l'étude. Ils s'entraînaient au moins cinq fois par semaine à ski durant la période hivernale et pratiquaient 10,6 ± 3,1 h d'activité sportive hebdomadaire le reste de l'année. Tous les sujets étaient des compétiteurs actifs et participaient à des compétitions internationales (FIS). Ils avaient 81,7 ± 9,1 points FIS. Avant les tests, tous les sujets étaient informés du protocole expérimental, incluant les éventuels risques et bénéfices. Tous les sujets

(ainsi que les responsables légaux pour les quatre mineurs de l'étude) avaient donné leur consentement écrit à la participation à cette expérimentation.

3.2.2 - Procédure

Les sujets réalisaient un test d'effort maximal jusqu'à épuisement (ou l'arrêt volontaire) sur bicyclette ergométrique afin de déterminer leur $\dot{V}O_{2max}$. Entre trois et cinq jours après le test d'effort maximal, les sujets réalisaient trois 80s-slide-test espacés de 48-72h. Ces tests avaient lieu sur une période de 11 jours. Il était demandé aux sujets de réaliser un échauffement standardisé et de le reproduire lors des trois sessions expérimentales. Les trois sessions de tests étaient conduites à l'intérieur d'une même fenêtre de 2h pour chaque sujet afin de minimiser l'effet des variations biologiques diurnes (Carter et al. 2002). Tous les tests étaient réalisés dans des conditions environnementales similaires (température, 20 ± 1°). Il était demandé aux sujets de s'abstenir de consommation d'alcool et d'activité physique intense 24h avant chaque session expérimentale. Tous les sujets étaient familiarisés avec le test d'effort maximal et avec le slide test. Les sujets visitaient également le laboratoire au préalable des expérimentations pour une session de familiarisation avec le matériel expérimental. L'étude était conforme aux recommandations de la Déclaration d'Helsinki et était approuvée par le comité local d'éthique.

3.2.2.1 - 80s-slide-test

L'échauffement standardisé consistait en 10min d'exercice à 100W sur ergocycle (Wattbike, Colombes, France), suivies de quatre sprints de 3s toutes les 30s suivantes. Les sujets réalisaient ensuite quatre appuis à intensité maximale sur la planche de slide. Le 80s-slide-test débutait 3min après la fin de l'échauffement. Les expérimentateurs donnaient les signaux sonores (i) de début de test, (ii) 20s avant la fin du test et (iii) à la fin du test. Les sujets pouvaient voir le chronométrage du temps d'effort lors du test. La consigne était de réaliser le plus d'appuis latéraux possible au cours des 80s de test sur la planche de slide. Les sujets avaient la consigne de conserver une attitude droite au niveau du buste. Après le test, 5min de récupération passive en position debout étaient respectées. La performance était mesurée à l'aide du nombre total d'appuis et de l'index de fatigue. Le 80s-slide-test était réalisé sur une planche de slide de 8 pieds (243,84 × 59,69 × 1,27 cm) (Ultraslide, Northbrook, US) (Figure 2.12). Les sujets étaient chaussés de sur-chaussures en nylon (Ultraslide, Northbrook, US) par-dessus des chaussures personnelles de type running. La surface de la planche de slide était faite de polyéthylène (coefficient de friction = 0,1). Avant chaque test, pour s'assurer du faible coefficient de friction, un spray de silicone (spray silicone lubrifiant, 250mL, 3 en 1, Bron,

France) était utilisé une fois au milieu de la planche de slide puis étalé à l'aide d'un chiffon neuf en microfibre. La partie inférieure de la planche de slide était faite d'un matériel adhérent (éthylène acétate de vinyle) pour assurer la stabilité de la planche de slide durant le test. Des tapis de gymnastique rigides étaient également placés sur le sol pour assurer l'adhérence du dispositif.

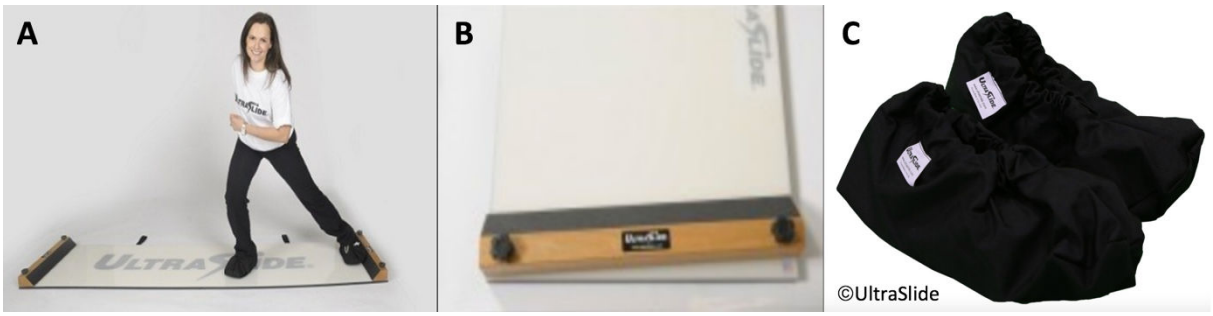


Figure 2.12 - Images de la planche de slide (**A**), des taquets latéraux (**B**) et des sur-chaussures en nylon (**C**)

3.2.3 - Mesures *in situ*

3.2.3.1 - Mesures biomécaniques

Les enregistrements vidéo étaient utilisés pour mesurer la fréquence des changements de direction lors du 80s-slide-test. La caméra était positionnée à 4m perpendiculairement à la planche de slide pour l'analyse cinétique en deux dimensions (2D). Le nombre total d'appuis et le nombre d'appuis par tranche de 10s étaient mesurés. L'index de fatigue était obtenu en utilisant le pourcentage de diminution adapté des travaux de Bishop et al. (2001b) et Spencer et al. (2006) :

Index de fatigue = (1-((nombre total d'appuis) / (nombre max d'appuis sur 10s*8))*100

Cet index de fatigue avait l'avantage de prendre en considération l'ensemble du test sans hypertrophier l'influence de 10 premières et dernières secondes particulièrement hautes ou basses.

3.3 - Analyse statistique

Les données étaient exprimées en valeur moyenne ± ET. Les trois tests statistiques nécessaires pour attester de la reproductibilité d'une mesure (Hopkins et al. 1999) étaient réalisés: la différence par rapport à la moyenne, la variation intra-sujet et la corrélation de retest. La différence par rapport à la moyenne était mesurée via les inférences basées sur la magnitude. La variation intra-sujet était mesurée via l'erreur typique de mesure (TEM) (Hopkins 2000). La corrélation de retest était mesurée via le coefficient de corrélation intra-class (ICC) avec un modèle à effet mixte à deux facteurs et une cohérence de type (McGraw et Wong 1996). La variabilité moyenne issue des deux mesures de ICC et TEM était interprétée comme faible (F) pour un ICC > 0,67 et un TEM < 5%, modérée (M) pour un ICC > 0,67 ou un TEM < 5%, et large (L) pour un ICC < 0.67 et un TEM > 5%. Le « Smallest worthwhile change » (SWC) était calculé en multipliant l'écart type entre deux tests par 0,2, comme un pourcentage de la moyenne des deux tests (Cohen 1988). SWC fournit une estimation d'un changement requis correspondant à une différence significative entre deux performances. L'analyse statistique était réalisée avec le logiciel Excel 2016 (Microsoft, USA).

3.4 - Résultats

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1 - Test 2				Test 2 - Test 3				
		Moyenne (± ET)		M_{diff} (%)	TEM (%)	ICC	Variabilité moyenne	M_{diff} (%)	TEM (%)	ICC	Variabilité moyenne	SWC (%)
Appuis totaux	93,1 (6,3)	95,3 (11,5)	97,4 (14,3)	2,13	4,3*	0,85†	F	2,13	2,5*	0,98†	F	2,17
Index de fatigue (%)	81,9 (6,9)	83,2 (5,1)	85,7 (4,0)	1,23	6,3	-0,02	L	2,56	3,2*	0,62	M	1,05
Δ[La] ($mmol.L^{-1}$)	11,3 (1,6)	10,3 (2,4)	9,0 (2,8)	-1,04	1,9*	0,16	M	-1,24	1,9*	0,54	M	5,63
RPE	15,6 (0,5)	14,6 (0,7)	14,4 (1,3)	-1,00	0,4*	0,73†	F	-0,25	0,8*	0,46	M	1,66
$\dot{V}O_{2pic}$ ($mL.min^{-1}.kg^{-1}$)	93,4 (3,9)	92,3 (4,6)	94,5 (4,3)	-1,13	4,2*	0,08	M	2,16	2,0*	0,87†	F	0,60
$\dot{V}O_{2moy}$ ($mL.min^{-1}.kg^{-1}$)	73,6 (4,4)	75,4 (5,4)	76,2 (7,9)	1,75	5,2	-0,07	L	0,79	2,9*	0,89†	F	1,08
FC_{pic} (bpm)	97,5 (2,0)	96,3 (2,2)	95,2 (1,8)	-1,15	1,6*	0,55	M	-1,12	1,2*	0,75†	F	0,36
FC_{moy} (bpm)	90,0 (2,6)	89,5 (3,8)	86,7 (4,0)	-0,45	2,1*	0,73†	F	-2,88	2,0*	0,86†	F	0,64

Tableau 2.3 - Mesure de la variabilité au cours du 80s-slide-test

M_{diff} : Différence à la moyenne ; TEM : Erreur typique de mesure ; ICC : Coefficient de corrélation intra-class ; Δ[La] : Variation de concentration sanguine en acide lactique ; RPE : Difficulté perçue de l'effort ; SWC : Smallest worthwhile change ; ET: Ecart type ; Variabilité moyenne : faible (F), modérée (M) et large (L).

† : ICC > 0,67

* : TEM < 5%

$\dot{V}O_{2max}$, FC_{max} et PMA étaient respectivement égales à 62,9 ± 4,9mL.min^{-1}.kg^{-1}, 199 ± 6bpm et 319,3 ± 55,0W.

Le Tableau 2.3 montre les variables mesurées au cours des trois sessions de 80s-slide-test et la variabilité moyenne entre la session 1 et la session 2 et entre la session 2 et la session 3. Un large degré de reproductibilité est observé entre les sessions 1 et 2 au niveau du nombre total d'appuis, de RPE et de FC_{moy}. Entre les sessions 1 et 2, Δ[La], $\dot{V}O_{2pic}$, FC_{pic}, l'index de fatigue et $\dot{V}O_{2moy}$ sont respectivement modérément reproductibles et peu reproductibles. Un large degré de reproductibilité est observé entre les sessions 2 et 3 pour le nombre total d'appuis, $\dot{V}O_{2pic}$, $\dot{V}O_{2moy}$, FC_{pic}, FC_{moy}. L'index de fatigue, Δ[La] et RPE sont modérément reproductibles entre les sessions 2 et 3.

La Figure 2.13 montre le nombre d'appuis par tranche de 10s au cours des trois sessions de 80s-slide-test. De 0 à 10s, le nombre d'appuis est 14,13 ± 1,55 (test 1), 14,00 ± 1,41 (test 2) et 14,00 ± 1,60 (test 3). Lors des 10s de fin de test (70-80s), le nombre d'appuis est 9,63 ± 2,07 (test 1), 10,30 ± 1,70 (test 2) et 11,00 ± 1,85 (test 3).

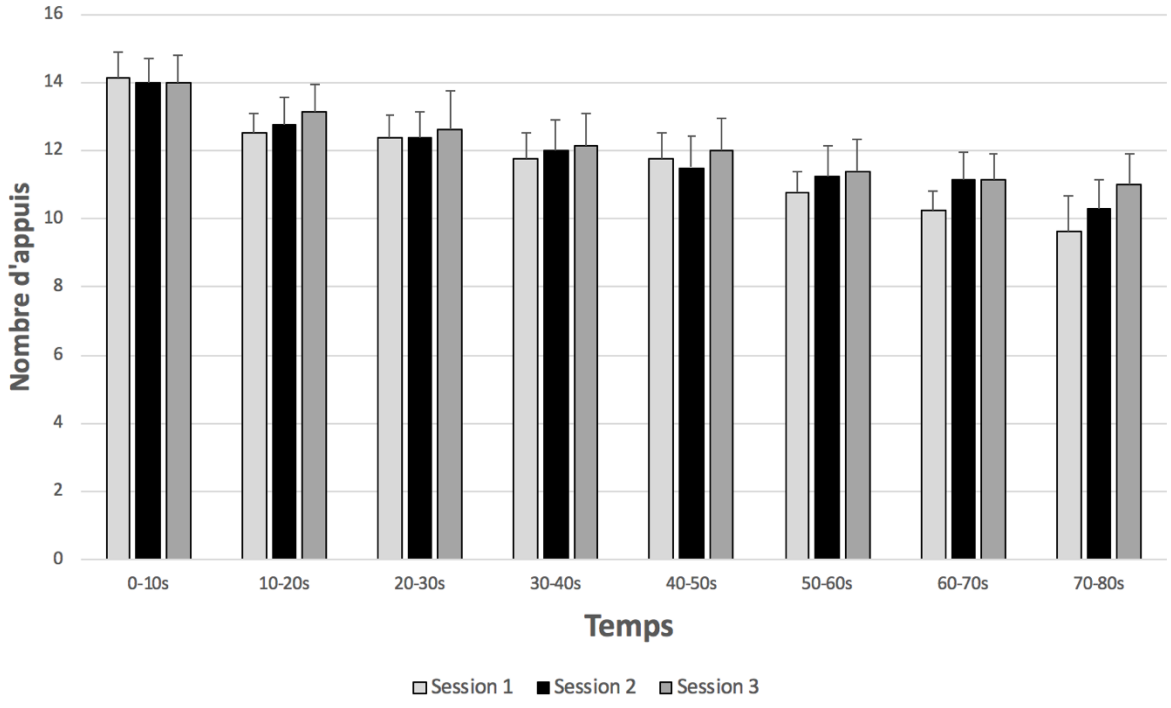


Figure 2.13 - Nombre d'appuis par tranche de 10s

4 - Etude n°4 : Stratégie de gestion de l'intensité de ski lors d'une manche longue de GS. Etude de cas.

4.1 - Introduction

La stratégie d'allure représente l'évolution de l'énergie métabolique que l'individu alloue à la tâche couplée à l'évolution de l'efficacité de l'individu dans cette tâche (Le Meur 2010). A notre connaissance, aucune étude n'a investigué la stratégie d'allure en ski alpin. Or, le couplage des contraintes physiologiques, mécaniques et perceptives laissent penser qu'une intensité maximale de ski ne serait pas tenable sur 100% d'une manche longue de GS. En effet, en GS, les skieurs doivent faire face à des contraintes mécaniques très élevées. La force de réaction du sol sous un pied peut atteindre des valeurs supérieures à $3N.BW^{-1}$ (Berg et al. 1995 ; Spörri et al. 2016), répétées toutes les 1,45 ± 0,11s (Spörri et al. 2016) durant 50 à 80s en fonction du profil de piste et du tracé. Lorsque les contraintes vibratoires (jusqu'à 30Hz) sont prises en considération, la force de réaction du sol peut atteindre des valeurs de 7000N durant des laps de temps très restreints de l'ordre de quelques microsecondes (Spitzenpfeil 2000). D'un point de vue physiologique, les valeurs de [La] observées en ski alpin dans la littérature s'échelonnent entre 6 et $16mmol.L^{-1}$ (Tesch et al. 1978 ; Veicsteinas et al. 1984 ; Saibene et al. 1985 ; Tesch 1995 ; Burtscher et al. 2000 ; Polat 2016). Une étude récente en GS long réalisée chez des skieurs entraînés rapporte des valeurs de [La] de 10,75 ± $2,02mmol.L^{-1}$ (Bottollier et al. 2019). Ces valeurs sont élevées mais loin des valeurs maximales, de l'ordre de 20 à $25mmol.L^{-1}$ (Karlsson et al. 1978 ; Tesch et al. 1978 ; Hintermeister et al. 2000), observées lors de tests maximaux chez des skieurs alpins. Ainsi, isolément, les contraintes physiologiques du skieur alpin ne constitueraient pas un facteur limitant de l'intensité de ski.

Compte tenu des fortes contraintes mécaniques et physiologiques, la motricité du skieur nécessite de conserver tout au long du parcours une précision spatio-temporelle importante. Dès lors, dans une acception dynamique, la pertinence de la réponse motrice du skieur dépend également de ses qualités perceptivo-décisionnelles. L'environnement du skieur est en effet caractérisé par une grande variabilité en termes de profil de piste, de design de tracé, de qualité de neige et de dégradation de la ligne de course (Turnbull et al. 2009). De plus, le principal canal perceptif visuel (Proteau 1992 ; Golomer et al. 1999) peut être grandement détérioré par les conditions météorologiques, notamment lors des conditions de «jour blanc» qui inhibent le contraste au niveau du manteau neigeux. Dans ce contexte, le skieur doit continuellement gérer les déséquilibres générés par le glissement et les trajectoires curvilignes.

Dans une perspective dynamique, la stratégie de gestion de l'intensité d'effort est continuellement modulée par le système nerveux central (De Koning et al. 2011 ; Faulkner et al. 2008 ; St Clair Gibson et al. 2003, 2006 ; Tucker 2009), de manière à ce que la RPE n'atteigne un niveau très élevé qu'en toute fin d'effort (Marcora 2008). Ainsi, ce serait la part d'effort restant à accomplir qui déterminerait la RPE cible à un pourcentage de temps d'effort donné (De Koning et al. 2011). A chaque instant, la RPE témoigne des afférences physiologiques (Noakes et al. 2004), de la part d'effort restant à accomplir (De Koning et al. 2011) et du niveau de motivation (Baron et al. 2011). En fonction de ces paramètres, le skieur minimise ou non son intensité de ski en fonction du risque de chutes et de blessures potentielles qu'il est prêt à engager (Foster et al. 2009).

La gestion de l'intensité d'effort dépendrait de l'intégration continue de facteurs internes et externes (Tucker 2009). Au niveau des facteurs externes, des travaux soulignent l'importance de la perception des caractéristiques de l'environnement (Smits et al. 2014 ; Renfree et al. 2014). Dès lors, la complexité de la tâche à accomplir pourrait influencer la gestion de l'intensité d'effort. Pour autant, la littérature s'appuie principalement sur le cyclisme et la course à pied dont les contraintes environnementales sont relativement stables et peu complexes. Les contraintes perceptivo-décisionnelles de ces activités sont limitées et ne demanderaient pas de gestion d'allure afin d'éviter la chute. Peu de pratiques sportives à contraintes énergétiques importantes se déroulent dans un environnement à la fois instable et variable. C'est le cas du ski alpin et du kayak slalom. En kayak, Zamparo et al. (2006) montrent une différence de [La] pour un temps d'effort similaire entre le kayak en ligne (environnement relativement stable) et le slalom (environnement très instable). Étudier la gestion de l'intensité d'effort en ski, et ses facteurs d'influence, permettrait d'affiner les objectifs d'entraînement mais également de progresser dans la compréhension de la gestion de l'intensité d'effort au cours de motricités complexes. **Le premier but de cette étude de cas était de décrire la stratégie d'allure du skieur alpin au cours d'une manche longue de GS. Notre première hypothèse était que le skieur alpin adopte une stratégie d'allure au cours d'une manche longue de GS (enchaînement section 1 et section 2, soit 81s d'effort) en anticipant la diminution de l'intensité au cours de la section 1 (premières 52s) puis au cours de la section 2 (dernières 29s). Le deuxième but de notre étude était d'analyser les relations entre la gestion de l'intensité du ski et l'évolution de la RPE. Notre seconde hypothèse était que le skieur diminue l'intensité de son ski avec une RPE inférieure en fin de section 1 lors d'une manche complète (section 1+2) par rapport à un arrêt de l'effort en fin de section 1.**

4.2 - Méthodes

4.2.1 - Sujets

4 skieurs masculins (18,7 ± 0,6 ans, 1,75 ± 0,10 m, 66,4 ± 10,4 kg) étaient volontaires pour participer à l'étude. Ils s'entraînaient au minimum 5 jours par semaine en ski alpin durant la saison hivernale. Tous les sujets étaient des compétiteurs actifs participant à des compétitions internationales FIS avec un niveau de performance de 75,3 ± 11,3 points FIS. Avant les tests, les sujets étaient informés de la procédure de l'étude, incluant les risques et bénéfices potentiels, et signaient leur consentement à la participation à l'étude. Tous les sujets, ainsi que les responsables légaux (un des sujets était mineur) avaient donné leur consentement écrit à la participation à cette expérimentation.

4.2.2 - Procédure

Les sujets réalisaient 3 tests de terrain séparés de 45min de récupération au cours d'une même demi-journée. Les sujets réalisaient de manière randomisée un GS entier (enchaînement section 1 et section 2, soit 81s d'effort), la section 1 du GS (premières 52s) et la section 2 du GS (dernières 29s). La durée du GS long, le protocole d'échauffement, le traçage et les recommandations aux sujets ont été fixés de la même manière que lors des études 1 et 2. L'étude était conforme aux recommandations de la Déclaration d'Helsinki et était approuvée par le comité d'éthique local.

Les tests étaient tous conduits dans des conditions environnementales similaires (luminosité ensoleillée ; température de l'air entre -7 et 0°C et température de la neige entre -7 et -2°C ; vent entre 0 et 15 $km.h^{-1}$).

4.2.3 - Mesures *in situ*

4.2.3.1 - Mesures de lactatémie sanguine et perception de la difficulté de l'effort

[La] et RPE étaient mesurées de la même manière que lors des études 1 et 2. Après le GS réalisé entièrement, il était également demandé au sujet d'indiquer la RPE lors de leur passage au niveau de la fin de la section 1 (matérialisée et dont les sujets ont préalablement connaissance).

4.3 - Analyse statistique

Les données étaient exprimées en valeur moyenne ± ET. Les forces de réactions du sol, RPE et [La] sont comparés entre les trois tests de GS à l'aide d'une analyse de variance à 2 voies (XLStat 2017, Paris, France). Le niveau de significativité était placé à $p < 0,05$.

4.4 - Résultats

L'ensemble des résultats de cette étude (Tableau 2.4) de cas ne permet pas de discerner de différences significatives entre les trois conditions expérimentales. Cela peut s'expliquer par la taille très restreinte de l'échantillon (4 sujets).

	$[La]_{pre}$ ($mmol.L^{-1}$)	$[La]_{post}$ ($mmol.L^{-1}$)	$\Delta[La]$ ($mmol.L^{-1}$)	Perf S1 (s)	Perf S2 (s)	Perf S1+S2 (s)	RPE S1	RPE S2	RPE S1+S2
Section 1	2,00 (0,43)	7,53 (2,86)	5,53 (2,42)	51,58 (1,01)			13,00 (3,37)		
Section 2	1,78 (0,72)	5,65 (1,80)	3,88 (1,08)		28,66 (0,60)			10,50 (1,73)	
Section 1+2	1,88 (1,11)	8,80 (2,62)	6,93 (1,51)	52,10 (0,84)	29,03 (1,11)	81,13 (1,47)	13,75 (2,63)		16,25 (1,71)

Tableau 2.4 - Concentration sanguine en acide lactique, performance et difficulté ressentie de l'effort lors des trois tests de ski

GS: slalom géant ; $[La]_{pre}$: lactatémie avant le test ; $[La]_{post}$: lactatémie après 3min de récupération ; $\Delta[La]$: différence entre $[La]_{pre}$ et $[La]_{post}$; Perf: performance chronométrique ; S1: section 1, correspondant aux 52 premières secondes de GS ; S2: section 2, correspondant aux 29 dernières secondes de GS ; S1+ S2: GS d'une durée de 81 secondes ; RPE : difficulté perçue de l'effort.

Les performances chronométriques sont de 51,58 ± 1,01s pour la section 1, 28,66 ± 0,60s pour la section 2 et 81,13 ± 1,47s pour la section 1+2. Lorsque l'ensemble du GS est réalisé (section 1+2), la performance de la section 1 est 52,10 ± 0,84s et celle de la section 2 est 29,03 ± 1,11s.

Les RPE sont de 13,00 ± 3,37 pour la section 1, 10,50 ± 1,73 pour la section 2 et 16,25 ± 1,71 pour la section 1+2. Lorsque l'ensemble du GS est réalisé (section 1+2), la RPE en fin de section 1 est 13,75 ± 2,63.

Les $[La]_{post}$ sont de 7,53 ± 2,86$mmol.L^{-1}$ pour la section 1, 5,65 ± 1,80$mmol.L^{-1}$ pour la section 2 et 8,80 ± 1,11$mmol.L^{-1}$ pour la section 1+2.

DISCUSSION GENERALE

1 - Partie scientifique

1.1 - Les contraintes métaboliques en ski alpin

L'étude 1 a permis d'investiguer les contraintes physiologiques et d'estimer la contribution des métabolismes énergétiques au cours de SL et de GS de durées différentes chez des skieurs entraînés. A notre connaissance, cette étude est la première à s'intéresser à la contribution des métabolismes énergétiques en SL, entre SL et GS et pour des durées d'efforts courtes et longues, représentatives des temps extrêmes de compétitions contemporaines.

1.1.1 - Contribution des systèmes énergétiques

Les résultats de cette étude montrent que la contribution du métabolisme aérobie à la production d'énergie est prédominante en GS. Elle représente 48,5 ± 2,5% de la production d'énergie en GSLG vs 29,9 ± 3,6% pour le métabolisme glycolytique et 21,6 ± 1,8% pour celui des phosphagènes. Cette contribution du métabolisme aérobie à la production d'énergie représente également 43,9 ± 5,7% de la production d'énergie en GSCT vs 26,5 ± 6,8% pour le métabolisme glycolytique et 29,6 ± 2,0% pour celui des phosphagènes. En revanche, aucune différence n'est observée entre la contribution des métabolismes aérobie et glycolytique à la production d'énergie en SLCT (34,3 ± 6,4% vs 36,3 ± 9,1%) et SLLG (39,9 ± 4,7% vs 34,6 ± 6,3%). De plus, le débit énergétique glycolytique est supérieur en SL (CT et LG) par rapport au GS (CT et LG). Concernant la durée d'effort, nos résultats montrent que le débit énergétique total, le débit énergétique aérobie et le débit énergétique glycolytique ne sont pas significativement différents entre SLCT et SLLG et entre GSCT et GSLG. Ainsi, les épreuves techniques de ski alpin (SL vs GS) semblent associées à des sollicitations physiologiques différentes, tel que nous l'avons suggéré dans notre hypothèse. Toutefois, contrairement à notre hypothèse, les sollicitations physiologiques ne semblent pas être influencées par la durée de l'effort (en SL et GS).

Au niveau de la contribution du métabolisme aérobie à la production d'énergie en GSLG (48,5 ± 2,5%), nos résultats se situent entre les résultats de Veictseinas et al. (1984) et Saibene et al. (1985) (30-46%) et les résultats de Burtscher et al. (2000) (~60%). Cependant, en accord avec les résultats de Burtscher et al. (2000) et contrairement à ceux de Veictseinas et al. (1984) et Saibene et al. (1985), nos résultats suggèrent que le métabolisme aérobie est la première source d'énergie en GS. Ces différences pourraient être due à des différences d'ordre méthodologique. En effet, Veicsteinas et al. (1984) ont mesuré l'implication des métabolismes énergétiques en GS à une altitude de 2850m. Cette altitude est plus élevée que celle de notre

étude. Elle peut avoir significativement influencé les valeurs de $\dot{V}O_2$ (Wehrlin et Hallen 2006) de l'étude de Veicsteinas et al. (1984). De plus, il est possible que les résultats aient été influencés par l'utilisation de Sacs de Douglas affectant la mobilité du skieur ainsi que ses trajectoires (Veicsteinas et al. 1984; Saibene et al. 1985). De surcroît, à cause de la taille réduite des Sacs de Douglas, Saibene et al. (1985) ont mesuré $\dot{V}O_2$ en trois sections au cours de trois essais différents par sujet, ce qui peut avoir généré une fatigue influençant les résultats. Les différences de résultats peuvent également provenir de l'évolution du matériel utilisé par les skieurs et de la manière de préparer les pistes (Neumayr et al. 2003; Mueller et al. 2004). En effet, l'apparition des skis paraboliques a permis la réalisation de virages coupés avec moins de dissipation d'énergie due au dérapage et avec des rayons de courbes réduits augmentant la force centripète (Mueller et al. 2004). Ainsi, les skieurs alpins sont confrontés à des forces de réaction du sol supérieures en utilisant des skis paraboliques. Comme ces évolutions ont engendré des contraintes musculaires supérieures, il semble logique qu'elles aient influencé la cinétique de $\dot{V}O_2$ (Bishop et al. 2002) et les sollicitations du métabolisme aérobie. Plus largement, de nombreux auteurs (Veicsteinas et al. 1984 ; Saibene et al. 1985 ; Tesch 1995 ; Burtscher et al. 2000 ; Neumayr et al. 2003 ; Zitoun-Florentin 2011 ; Grenier et al. 2012) ont discuté de l'importance du métabolisme aérobie lors de manches de ski alpin. Une mauvaise interprétation de la Courbe d'Howald (Howald et al. 1978) aurait souvent mené les entraîneurs à conclure (i) que le métabolisme aérobie ne produit de l'énergie que pour des durées importantes d'effort et (ii) qu'un seul métabolisme énergétique contribue à la production d'énergie lors d'un effort d'intensité maximale (Gastin 2001). Cependant, le métabolisme aérobie produit également de l'énergie lors d'effort de courtes durées (Gastin 2001), telles que les épreuves de SL et GS. De plus, comme les métabolismes énergétiques fonctionnent de manière concomitante (Astrand et Rodahl 1997), pour une durée d'effort donnée, des qualités aérobies importantes pourraient permettre de réduire la contribution du métabolisme glycolytique à la production d'énergie. Dans la mesure où le métabolisme glycolytique produit des métabolites capables de diminuer la capacité à maintenir un effort d'intensité maximale (Kindermann et al. 1979), une moindre accumulation de métabolites pourrait être un moyen de maintenir une haute intensité d'effort. Enfin, une $\dot{V}O_{2max}$ élevée est pertinente pour faire face aux contraintes hypoxiques, pour maintenir une charge d'entraînement élevée et pour récupérer de manière rapide (Neumayr et al. 2003). Tous ces avantages renforcent la nécessité de fixer le développement du métabolisme aérobie comme un des objectifs essentiels de l'entraînement chez le skieur alpin.

Par ailleurs, les résultats de notre étude montrent des différences de contribution des métabolismes énergétiques entre SL et GS. Lorsque l'on compare SLLG et GSCT (temps

d'effort similaires), le débit énergétique glycolytique ainsi que $[La]_{pic}$ et RPE ($p < 0,01$) sont significativement plus élevés en SLLG par rapport au GSCT. Aucune différence de débit énergétique aérobie n'est identifiée entre ces deux tests. La prédominance de la contribution du métabolisme glycolytique en SLLG par rapport au GSCT pourrait être une conséquence des différences de contraintes biomécaniques entre les deux disciplines. En effet, Spörri et al. (2016) montrent que la fréquence gestuelle diffère entre SL et GS dans la mesure où la durée de virage est différente entre SL (0,90 ± 0,04s) et GS (1,45 ± 0,11s). De plus, SL est caractérisé par une force de réaction du sol plus importante (2,13 ± 0,37N.BW^{-1} vs 1,68 ± 0,32N.BW^{-1}) et plus courte proportionnellement à la durée de virage (Spörri et al. 2016). Finalement, les angles (98-111° vs 86-114°) et vitesses angulaires (69 ± 11°.s^{-1} vs 34 ± 2°.s^{-1}) au niveau de l'articulation du genou sont plus élevés en SL par rapport au GS (Berg et Eiken 1999).

1.1.2 - Paramètres cardio-respiratoires et métaboliques

Nos résultats montrent (i) que $\dot{V}O_2$ augmente de manière similaire lors des quatre tests et (ii) que 35-40s sont nécessaires pour atteindre des niveaux importants de $\dot{V}O_2$ (entre 70 et 75% of $\dot{V}O_{2max}$). Cette durée pour atteindre 70-75% de $\dot{V}O_{2max}$ semble longue (Gastin 2001) au regard des 94% de $\dot{V}O_{2max}$ atteints en moins de 25s chez des athlètes très entraînés lors d'un 400m en course à pied (Hanon et al. 2010). Une cinétique rapide de $\dot{V}O_2$ dépend des qualités aérobies (Phillips et al. 1995) et de la qualité de l'échauffement cardio-respiratoire (Wittekind et al. 2012). Premièrement, les sujets de notre étude ont des $\dot{V}O_{2max}$ similaires à celles des skieurs membres des équipes nationales autrichiennes et françaises (Neumayr et al. 2003; Zitoun-Florentin 2011). Toutefois, bien que les skieurs alpins réalisent un entraînement aérobie, c'est rarement un objectif d'entraînement prioritaire. Cela explique en partie l'écart de $\dot{V}O_{2max}$ observé entre les skieurs alpins et les athlètes de haut niveau spécialistes de discipline d'endurance. Deuxièmement, afin de répliquer les contraintes physiologiques de compétitions en ski alpin, il a été demandé aux sujets de réaliser un échauffement précompétitif habituel. Toutefois, il est possible que la qualité d'échauffement des sujets n'ait pas été optimale au regard des faibles valeurs de $\dot{V}O_{2départ}$ (entre 26,1% et 34,0% de $\dot{V}O_{2max}$) et de la cinétique relativement lente de $\dot{V}O_2$. C'est un challenge pour les entraîneurs de mettre en place une routine d'échauffement pertinente sur le plan cardio-respiratoire étant donné les contraintes environnementales d'un sommet de piste de ski (Sporer et al. 2012). Pourtant, un échauffement cardio-respiratoire de qualité pourrait augmenter la contribution du métabolisme aérobie à la production d'énergie et diminuer celle du métabolisme glycolytique (Wittekind et al. 2012).

Cela pourrait diminuer l'accumulation de métabolites provenant du métabolisme glycolytique et ainsi limiter l'accumulation d'ions Hydrogène et l'acidose musculaire (Robergs et al. 1990).

Par ailleurs, la plus faible valeur de $\dot{V}O_{2pic}$ est observée en SLCT (76,9 ± 6,2% de $\dot{V}O_{2max}$) et la valeur la plus élevée en SLLG (83,7 ± 5,8% de $\dot{V}O_{2max}$). Contrairement au GS, le plateau de $\dot{V}O_2$ pourrait ne pas être atteint en SL. En effet, la plus faible valeur de $\dot{V}O_{2pic}$ observée en SLCT serait en lien avec un temps d'effort trop court pour atteindre un plateau de $\dot{V}O_2$ (Xu et Rhodes 1999). Nos résultats apparaissent inférieurs, ou dans la fourchette basse, de ceux de la littérature (entre 79 et 93 % de $\dot{V}O_{2max}$) pour un effort de 60 à 82s (Tesch et al. 1978 ; Saibene et al. 1985 ; Rognmo et al. 2002). Cette différence de résultats pourrait être due à l'évolution du matériel de ski ainsi qu'à la variabilité des caractéristiques des tracés. Nos résultats montrent également que $\dot{V}O_{2max}$ n'est jamais atteinte, quelle que soit la durée de compétition, en SL et GS. Ce résultat pourrait s'expliquer par la prédominance de contractions excentriques (Berg et al. 1995) au faible coût énergétique (Perrey 2003). De plus, d'importantes ischémies musculaires ont lieu au niveau des membres inférieurs (Berg et Eiken 1999), ce qui inhibe l'oxygénation musculaire (Hogan et al. 1994) et probablement $\dot{V}O_2$ (Tesch 1995). Conformément à la littérature (Karlsson et al. 1978), FC_{pic} atteint 95% de FC_{max} mais ne varie pas en fonction des disciplines et des durées d'effort. La différence de valeurs entre FC_{pic} (environ 95% de FC_{max}) et $\dot{V}O_{2pic}$ (entre 76,9 ± 6,2% et 83,7 ± 5,8% de $\dot{V}O_{2max}$) est régulièrement observée dans la littérature (Cunha et al. 2011). Comme observé par Karlsson et al. (1978), $FC_{départ}$ est très élevée (entre 69,7 et 73,2% de FC_{max}). En revanche, les valeurs de $\dot{V}O_{2départ}$ sont faibles (entre 26,1% et 34,0% de $\dot{V}O_{2max}$). La différence observée entre $FC_{départ}$ et $\dot{V}O_{2départ}$ pourrait être due à la sensibilité émotionnelle de la FC lors d'épreuves de type compétitives et lors d'expérimentations utilisant un matériel inhabituel (Hintermeister et al. 2000). Concernant SL, $\dot{V}O_{2pic}$ est significativement plus élevée ($p < 0,05$) en SLLG (83,7 ± 5,8% de $\dot{V}O_{2max}$) par rapport à SLCT (76,9 ± 6,2% de $\dot{V}O_{2max}$). Aucune différence de $\dot{V}O_{2pic}$ n'est observée entre GSCT et GSLG et entre SLLG et GSCT. Entre 55s et la fin de GSLG, $\dot{V}O_{2moy\ 5s}$ reste au-dessous de 75% de $\dot{V}O_{2max}$ et aucune augmentation n'est observée. De manière intéressante, Zamparo et al. (2006) observent un seuil de $\dot{V}O_2$ identique (environ 77% de $\dot{V}O_{2max}$) en kayak slalom entre 60s et la fin (86s) de l'effort. Ce seuil de $\dot{V}O_2$ semble donc correspondre aux exigences en O_2 pour ce type d'effort. Toutefois, les valeurs de [La] correspondantes à ce niveau de $\dot{V}O_2$ devraient se situer en deçà du seuil de 4mmol.L^{-1} (Kindermann et al. 1979). Pourtant, les valeurs de $[La]_{pic}$ observées dans notre étude sont 10,2 ± 2,6mmol.L^{-1} en SLCT, 11,1 ± 2,4mmol.L^{-1} en SLLG, 8,0 ± 2,0mmol.L^{-1} en GSCT et 10,8 ±

2,0mmol.L^{-1} en GSLG. Ces valeurs sont en accord avec celles des études *in situ* de la littérature (Tesch et al. 1978 ; Veicsteinas et al. 1984 ; Saibene et al. 1985 ; Tesch 1995 ; Burtscher et al. 2000 ; Polat 2016).

Les quatre tests utilisés lors de notre étude respectent la réglementation de la FIS, relatives à la dénivellation du tracé, aux écarts minimum et maximum entre les portes, au nombre de portes et de changements de direction. Toutefois, le fait que le traceur puisse proposer de manière règlementaire des tracés très différents sur une même piste (en faisant varier les écarts latéraux et verticaux entre les portes) (Gilgien et al. 2015) constitue une limite à notre étude. De plus, l'absence d'investigation de différentes conditions environnementales (par exemple de visibilité et de qualité de neige) et de différents designs de tracés doit être considéré comme une limite à la généralisation de nos résultats. **En conclusion, notre étude a montré que quelle que soit la durée de GS en compétition, le métabolisme aérobie est prédominant dans la fourniture d'énergie. En revanche, les contributions respectives des métabolismes aérobie et glycolytique à la fourniture d'énergie ne sont pas significativement différentes en SL.**

1.2 - La gestion de l'intensité de ski

Lors de notre étude 4, nous souhaitions étudier la gestion de l'intensité de ski et le lien entre la RPE et cette gestion de l'intensité. Pour rappel, le nombre de sujets (n = 4) étudiés ne permettait pas de procéder à une analyse statistique. Nous considérons donc cette étude comme une étude de cas et nous parlerons donc dans la partie qui va suivre de tendance en termes de résultats. Ces derniers semblent montrer que le skieur est plus performant sur des portions de tracés réalisées isolément (section 1 ou section 2) par rapport au même tracé réalisé dans sa totalité (section 1 + 2). Ils semblent montrer, en effet, que la section 1 et la section 2 d'un GS long sont réalisées plus rapidement isolément qu'en les enchaînant. Le skieur alpin adopterait donc une stratégie d'allure au cours d'une manche longue de GS, en diminuant l'intensité de ski de manière anticipée dès la section 1 puis durant la section 2. Dès lors, au cours d'un GS long le skieur alpin n'utiliserait pas une stratégie d'intensité de ski de type « all out » qui consisterait à démarrer la manche à intensité maximale dès le début de l'effort. Pourtant, lors du GS long, la valeur moyenne de $[La]_{pic}$ observée est de 8,80 ± 2,62mmol.L^{-1}, soit une valeur correspondant à celles de la littérature, situées entre 6 et 16mmol.L^{-1} (Tesch et al. 1978 ; Veicsteinas et al. 1984 ; Saibene et al. 1985 ; Tesch et al. 1995 ; Burtscher et al. 2000 ; Polat 2016). Pour autant, nos valeurs sont sensiblement éloignées de celles observées (20 à

25mmol.L^{-1}) chez des skieurs alpins lors de tests physiques et de séances de préparation physique (Karlsson et al. 1978 ; Tesch et al. 1978 ; Hintermeister et al. 2000). Bien que ces valeurs de $[La]_{pic}$ proviennent d'études différentes, on peut se demander pourquoi les valeurs de $[La]_{pic}$ mesurées chez nos skieurs alpins sont largement inférieures en situation écologique de ski par rapport au contexte de préparation physique alors même qu'une stratégie de gestion de l'intensité de ski « all out » ne semble pas utilisée ?

La complexité des contraintes perceptivo-décisionnelles auxquelles le skieur alpin doit faire face pourrait expliquer ces résultats (Baron et al. 2009 ; Smits et al. 2014 ; Renfree et al. 2014). En effet, la variabilité de l'environnement caractérisant le ski alpin implique des contraintes perceptives pour déceler les variations (i) de la qualité de neige (régularité du manteau neigeux et détérioration due au passage des skieurs), (ii) des distances horizontales et verticales entre les portes, (iii) de la pente et de l'orientation de la piste et (iv) de la visibilité. Par exemple, en kayak slalom – qui implique une variabilité environnementale comparable à celle du ski alpin – des travaux montrent des valeurs de $[La]_{pic}$ inférieures de 30% par rapport à celles mesurées en kayak en ligne au cours d'un temps d'effort similaire (Zamparo et al. 2006). Les auteurs ne discutent pas ces résultats. Ces résultats pourraient toutefois s'expliquer par le fait que le kayakiste rencontre en slalom d'importantes contraintes perceptivo-décisionnelles proches de celles du skieur alpin, ce qui n'est pas le cas dans la discipline de kayak en ligne dans laquelle la surface de l'eau relativement plate constitue un environnement plus stable. En kayak slalom et en ski alpin, les athlètes peuvent être disqualifiés si leurs trajectoires ne respectent pas l'emplacement des portes. Ainsi, tout en maintenant le débit énergétique le plus élevé possible, ces athlètes doivent conserver une précision spatio-temporelle de trajectoire en composant avec une gestion constante des déséquilibres dans un environnement hautement variable. Pour préciser le contexte, la fatigue musculaire - caractéristique de ces efforts - diminue la précision de la gestion des déséquilibres (Johnston et al. 1998). La RPE dépendrait des afférences physiologiques (Noakes et al. 2004 ; Hampson et al. 2004) et de la perception de la complexité de la tâche à accomplir (Baron et al. 2009 ; Smits et al. 2014 ; Renfree et al. 2014). Ces feedbacks physiologiques sont notamment relatifs à l'acidose musculaire (Tucker et Noakes 2009) et à l'implication d'un mode de contraction musculaire excentrique (Baron et al. 2009) - deux facteurs caractéristiques du ski alpin. La RPE est également influencée par la perception de la distance (ou part de distance) restant à accomplir (Swart et al. 2009 ; Wittekind et al. 2011 ; Amann et Secher 2010 ; De Koning et al. 2011), par l'expérience de ce type d'effort (Wittekind et al. 2011 ; Amann et al. 2010 ; Foster

et al. 2009 ; Mauger et al. 2009 ; Baron et al. 2010) et par les afférences psychologiques (Wright 1998, 2008 ; Amann et al. 2010 ; Baron et al. 2011 ; Marcora et al. 2009). En effet, selon les résultats de notre étude, la RPE serait influencée par la perception du parcours restant à accomplir. Elle serait plus importante en fin de section 1 s'il reste la section 2 à accomplir par rapport à un arrêt en fin de section 1. Cette tendance invalide notre seconde hypothèse selon laquelle l'intensité de ski serait diminuée de manière anticipée avec une RPE inférieure en fin de section 1 si la manche se poursuit jusqu'en fin de section 2 par rapport à une fin de manche en fin de section 1. La gestion de l'intensité d'effort est perpétuellement régulée au niveau central (Noakes et al. 2004) sur la base de l'écart entre la RPE et la projection de celle qu'elle devrait être pour n'atteindre un niveau maximal qu'en toute fin d'effort (Tucker et Noakes 2009). De manière anticipée durant la section 1 d'un GS long (section 1+2), le skieur percevrait qu'une telle durée de GS nécessite de ne pas adopter une stratégie « all out ». Une diminution de l'intensité de ski n'intervient que si la RPE est plus élevée que celle perçue comme optimale à cet instant d'effort. De plus, les afférences provoqueraient en début de GS long une RPE supérieure à un GS plus court amorçant une diminution de l'intensité de ski qui perdurerait jusqu'à la ligne d'arrivée comme semble le montrer les résultats de notre étude. Le niveau maximal acceptable de RPE en fin d'effort dépend également du niveau de prise de risque acceptable de l'individu (Foster et al. 2009). Ce niveau de prise de risque acceptable découle de perception subjective du risque et de la propension individuelle à la prise de risque (Blias et Weber 2006). Plus précisément, les risques dont il est question en ski alpin sont le risque de disqualification (si la trajectoire ne respecte pas le tracé) et le risque de chute hypothéquant toute chance de performance signifiante et susceptible de provoquer une blessure.

Ainsi, à chaque instant de l'effort, le skieur peut (i) diminuer la vitesse pour diminuer le risque de disqualification à un niveau acceptable, ou (ii) augmenter la vitesse si cela ne provoque pas un dépassement du niveau de risque acceptable et si la vitesse n'était pas déjà maximale, ou (iii) maintenir la vitesse. Lorsque la vitesse diminue, le temps réalisé augmente ce qui diminue la performance. Le facteur limitant la performance du skieur serait donc la gestion complexe (i) de fortes contraintes musculaires, (ii) des déséquilibres et (iii) de niveau d'acidose musculaire important, tout ceci avec la nécessité d'une précision spatio-temporelle de trajectoire dans un environnement hautement variable. Si ce facteur limitant semble particulièrement complexe, il refléterait particulièrement bien les problèmes majeurs auxquels sont confrontés les skieurs alpins. **Pour conclure, les résultats de notre étude semblent montrer que le skieur alpin adopte une stratégie d'allure au cours d'une manche longue de GS en diminuant l'intensité de ski de manière anticipée dès la section 1 puis durant la**

section 2 lors d'un GS long. Cette diminution anticipée de l'intensité de ski serait en lien avec une RPE supérieure en fin de section 1 si la manche se poursuit jusqu'en fin de section 2 par rapport à un arrêt en fin de section 1.

1.3 - Spécificité aux demandes énergétiques du ski alpin de différentes motricités

L'étude 2 a permis d'investiguer la spécificité des contraintes physiologiques de différentes motricités (slide, bonds latéraux sur trampoline, bonds latéraux sur box, course à pied, cyclisme) par rapport à celles du SL et du GS. Notre hypothèse était que le slide, les bonds latéraux sur box et les bonds latéraux sur trampoline seraient spécifiques des contraintes physiologiques du SL et du GS, et que ça ne serait pas le cas pour la course à pied et le cyclisme. A notre connaissance, cette étude est la première à montrer que les bonds latéraux sur box et les bonds latéraux sur trampoline présentent des similitudes physiologiques avec le SL et le GS, et que le slide est la motricité la plus spécifique des disciplines techniques du ski alpin, du point de vue physiologique. En effet, aucune différence significative n'a été observée entre le slide et le SL et le GS au niveau de la part d'implication des métabolismes aérobie et glycolytique, du débit énergétique total, du débit énergétique glycolytique, du débit énergétique aérobie, du débit énergétique des phosphagènes, des valeurs de $[La]_{pic}$ et de $\Delta[La]$. $\dot{V}O_{2pic}$ est significativement plus élevée en slide par rapport au GS et au SL mais reste inférieure aux quatre autres motricités testées. Aucune différence significative de RPE n'est observée entre le slide et le GS. RPE est plus élevée en SL par rapport au slide. Toutefois, la valeur de RPE en slide (13,8 ± 1,2) est la seule entre les RPE du GS (13,4 ± 0,7) et du SL (15,4 ± 1,4). La spécificité physiologique du slide par rapport au SL et GS pourrait s'expliquer au regard de ses caractéristiques biomécaniques. Baum et al. (1997) montrent, en effet, que les caractéristiques biomécaniques du slide sont plus spécifiques du ski alpin par rapport à la course à pied et au cyclisme: (i) comme en ski alpin, l'orientation de la force de réaction du sol est latérale (vs frontale en course à pied et en cyclisme), (ii) le mode de contraction des quadriceps est excentrique puis concentrique (vs concentrique en cyclisme), (iii) la charge est supérieure à la masse de l'individu (vs inférieure à la masse de l'individu en cyclisme) et (iv) le ratio entre le temps de charge maximal et les charges inférieures pour une jambe est 1-1 (vs 1-3 en course à pied). De plus, en accord avec nos résultats (0,96 ± 0,17s), Baum et al. (1997) montrent que le timing de changement de direction en slide se situe entre 0,8s et 1,2s. Ces caractéristiques sont similaires à celles rapportées en SL (0,8s) et GS (1,4-1,7s) (Berg et Eiken 1999; Kröll et al. 2015). Finalement, Baum et al. (1997) montrent en slide des angles minimum (110-130°) au niveau de l'articulation du genou similaires à ceux (107-122°) du SL et du GS (Szmedra et al.

2001; Kröll et al. 2015). Pour attester de la spécificité d'une motricité, Sheppard et al. (2006) suggèrent de prendre en considération les paramètres perceptivo-décisionnels en plus des paramètres physiologiques et biomécaniques. Par exemple, en hockey sur glace, un test physique incluant une gestion des déséquilibres (sur une jambe) est plus corrélé aux performances de patinage que l'ensemble des autres tests physiques investigués (Henriksson et al. 2016). Comme en ski alpin l'athlète, au cours du slide, doit s'adapter à sa perception des déséquilibres principalement latéraux en vue de créer une force centripète adaptée à ces contraintes environnementales. En slide, le déséquilibre est créé par les forces volontairement générées par l'athlète de la même manière qu'en ski alpin. Cela signifie que lorsque la fatigue se fait ressentir, l'athlète a le choix de moins impulser – devenant moins performant – en créant moins de déséquilibres en vue de ne pas augmenter les risques de chute au-delà d'un seuil acceptable (Foster et al. 2009). Ce processus perceptivo-décisionnel inconscient régule la gestion de l'intensité d'effort et les contraintes physiologiques subséquentes (Noakes et al. 2004). Gérer les déséquilibres est au cœur de la pratique du ski alpin. Aussi, une motricité ne saurait être réellement spécifique de cette discipline sans valider cette caractéristique de l'activité. C'est, par exemple, le cas du cyclisme et de la course à pied dont la gestion minime des déséquilibres ne constituerait pas un frein à la gestion de l'intensité en vue de limiter le risque de chute.

En accord avec notre hypothèse, la course à pied et le cyclisme ne sont pas spécifiques des contraintes physiologiques de SL et GS. En effet, le débit énergétique total, le débit énergétique glycolytique ainsi que les valeurs de $[La]_{pic}$ et de $\Delta[La]$ sont significativement supérieurs en course à pied et en cyclisme par rapport au SL et GS. La contribution des métabolismes aérobie, glycolytique et du système des phosphagènes à la production d'énergie en cyclisme ainsi que la contribution du métabolisme glycolytique et du système des phosphagènes en course à pied sont significativement supérieures par rapport au GS. La contribution du métabolisme glycolytique et du système des phosphagènes à la production d'énergie en cyclisme ainsi que la contribution du système des phosphagènes en course à pied sont significativement supérieures par rapport au SL.

Le choix restreint des motricités investiguées dans cette étude émane (i) des rares études abordant la spécificité des motricités au ski alpin, (ii) des pratiques de terrain et (iii) de la simplicité d'utilisation de ces motricités sur le terrain. Cette étude avait pour objectif d'alimenter les connaissances relatives à la spécificité au ski alpin de différentes motricités, bien que toutes les motricités potentielles n'aient pas été investiguées. Une limite de la spécificité au ski alpin du slide serait la régularité et la stabilité de l'environnement qu'il

propose. Ses caractéristiques diffèrent de la pratique écologique du ski alpin (Seifert 2009). En effet, le ski alpin n'est absolument pas régulier et stable si l'on considère l'irrégularité (i) de la qualité de neige, (ii) des distances horizontales et verticales entre les portes, (iii) de la pente et de l'orientation de la piste et (iv) de la visibilité (Seifert 2009). Pour aller plus loin, les aspects stratégiques des trajectoires pertinentes du ski alpin ne caractérisent pas la motricité du slide. Toutefois, la stabilité de la motricité du slide laisse présager d'une potentielle reproductibilité d'un test physique l'utilisant. **Pour conclure, notre étude a montré que la motricité du slide est la plus spécifique de SL et GS au regard de la spécificité de ses paramètres physiologiques (part d'implication des métabolismes aérobie et glycolytique, débit énergétique total, glycolytique et aérobie, valeurs de $[La]_{pic}$ et de $\Delta[La]$). La motricité des bonds latéraux sur box et celle des bonds latéraux sur trampoline représentent également des similarités physiologiques intéressantes par rapport au SL et GS. En revanche, la course à pied et le cyclisme sont les motricités investiguées les moins spécifiques de SL et GS.**

1.4 - Validation d'un test mesurant les qualités énergétiques spécifiquement exploitées en ski alpin

L'étude 3 a permis d'investiguer la reproductibilité du 80s-slide-test chez des skieurs entraînés. A notre connaissance, cette étude est la première à s'intéresser à la reproductibilité d'un test physique spécifique de contraintes métaboliques du ski alpin.

Notre hypothèse selon laquelle le 80s-slide-test est reproductible chez des skieurs entraînés est vérifiée au regard du large degré de reproductibilité entre le test 2 et le test 3 au niveau du nombre total d'appuis, de $\dot{V}O_{2pic}$, de $\dot{V}O_{2moy}$, de FC_{pic} et de FC_{moy}. De la même manière que lors de tests incrémentaux chez des patineurs de vitesse (Piucco et al. 2015, 2016, 2017) et chez des skieurs (Baum et al. 1997), le slide permet de réaliser un test rectangulaire reproductible sur un temps de 80s. Le nombre total d'appuis et FC_{moy} révèlent une reproductibilité forte entre les tests 1 et 2 et entre les tests 2 et 3. La reproductibilité semble plus prononcée entre les tests 2 et 3 dans la mesure où $\dot{V}O_{2pic}$, $\dot{V}O_{2moy}$, FC_{pic} montrent une haute reproductibilité ce qui n'est pas le cas entre les tests 1 et 2. De plus, parmi les 8 variables mesurées, 7 valeurs de TEM et 7 valeurs de ICC augmentent ou sont égales entre les tests 2 et 3 et les tests 1 et 2. Ces résultats signifient que le 80s-slide-test est reproductible dès le premier test si le nombre total d'appuis est utilisé comme seul paramètre. Cependant, la reproductibilité est renforcée lorsque l'athlète a déjà réalisé un 80s-slide-test au préalable. Les sujets de notre étude étaient familiarisés avec la motricité du slide mais pas avec le 80s-slide-test. Un effet

d'apprentissage pourrait être observé entre les tests 1 et 2. Une variation de 2,17% (SWC) permet d'observer une évolution significative de performance (nombre d'appuis total) entre deux tests. L'index de fatigue, Δ[La] et RPE ne sont que modérément reproductibles entre les tests 2 et 3. Wittekind et al. (2011) montrent la sensibilité de RPE à l'expérience de l'effort réalisé. La RPE pourrait donc s'avérer davantage reproductible avec une expérience du 80s-slide-test. Par ailleurs, si le 80s-slide-test est physiologiquement spécifique du SL et du GS, cela n'a pas été étudié au niveau des disciplines de vitesse (SG et DH). En effet, aucune donnée physiologique *in situ* sur les disciplines de vitesse n'existe dans la littérature, principalement à cause des problématiques logistiques de préparation de piste et de sécurité avec le matériel portable de mesure. Ces éléments expliquent pourquoi il est difficile de savoir si le 80s-slide-test est aussi pertinent pour les spécialistes de SG et DH qu'il ne l'est pour les spécialistes de SL et GS. **Pour conclure, notre étude a montré que le 80s-slide-test est un test physique spécifique du ski alpin et reproductible. En effet, le nombre total d'appuis, $\dot{V}O_{2pic}$, $\dot{V}O_{2moy}$ et FC_{moy} sont reproductibles. La reproductibilité de l'index de fatigue, de RPE et des valeurs de Δ[La] n'étant que modérée, ces paramètres devraient être utilisés et analysés avec précaution. Ainsi, le 80s-slide-test constitue une alternative pertinente aux tests physiques non spécifiques du ski alpin menés en laboratoire.**

2 - Partie application pratique

2.1 - Affinage des objectifs d'entraînement

Il était important d'apporter des arguments objectifs au débat, de longue date, sur la contribution relative des différents métabolismes énergétiques (aérobie vs glycolytique) en ski alpin. En effet, la mauvaise interprétation de la courbe d'Howald laisse penser (i) qu'un seul métabolisme apporte de l'énergie à un instant t, donc que si le métabolisme glycolytique - dont les afférences physiologiques permettent de sentir l'effet des métabolites qu'elle produit - fonctionne, le métabolisme aérobie ne fonctionne pas et, (ii) que le métabolisme aérobie, imprégné d'une image d'endurance, ne devient important qu'après de longues minutes d'effort. Parallèlement, le développement du métabolisme aérobie est faussement associé à une évolution de la typologie musculaire à court terme des fibres rapides de type IIa et IIb vers des fibres lentes de type I. Or, le skieur a indéniablement besoin de force pour faire face aux contraintes biomécaniques particulièrement importantes, ce que permettrait moins une transformation de la typologie musculaire vers davantage de fibres lentes. Ce raisonnement pourrait être tenable si la typologie musculaire n'avait pas une inertie particulièrement

importante et si les fibres de type I pouvait se transformer directement en fibres très rapides de type IIb. En effet, lors d'un entraînement visant à développer différentes qualités physiques, comme c'est le cas chez le skieur alpin, la typologie musculaire serait relativement stable. De plus, concernant la force spécifique, les fibres lentes ne développent pas moins de force (par unité de surface de fibre) que les fibres rapides. Ainsi, après avoir tenté de déconstruire une culture faussée quant à l'intérêt des qualités de puissance aérobie chez le skieur alpin, il ne s'agit pas non plus de lancer une mode opposée consistant à placer cette qualité physique tout en haut de la liste d'objectifs d'entraînement.

Afin de préparer les skieurs spécialistes de SL et GS, il semble important au vu des résultats de l'étude 1 de fixer comme objectif d'entraînement le développement des métabolismes aérobie, glycolytique ainsi que celui des phosphagènes. Ainsi, les skieurs seront physiologiquement armés pour réaliser des SLCT et des GSLG. Pour aller plus loin, il serait intéressant pour les spécialistes de SL de mettre l'accent sur le développement des métabolismes glycolytique et aérobie sans pour autant négliger celui des phosphagènes. En revanche, pour les spécialistes de GS, l'accent devrait être mis sur le développement de la puissance aérobie sans pour autant négliger celui des métabolismes glycolytique et des phosphagènes. Ces préconisations d'objectifs d'entraînement sont à pondérer au regard du stade de développement du skieur et de ses objectifs sportifs à moyen et surtout long terme. Bien que la compétence d'un entraîneur ne soit souvent jugée qu'à l'aune de ses résultats à court terme, il semble que la prise en compte d'une projection à plus long terme soit une compétence professionnelle particulièrement précieuse chez les entraîneurs. Il serait donc louable de laisser davantage de place à ce paramètre au niveau des compétences prioritaires des entraîneurs de ski alpin.

Si l'on s'intéresse aux objectifs d'entraînement du skieur alpin dans un passé récent ou lointain, on remarque que les objectifs de développement énergétique ne sont indéniablement pas les plus importants. En effet, notre questionnement nous amène à penser que le facteur limitant de la performance en ski alpin est la gestion complexe des fortes contraintes musculaires, des déséquilibres et d'une acidose musculaire marquée dans un contexte ou une précision spatio-temporelle de trajectoire dans un environnement hautement variable est indispensable. Si ce facteur limitant semble particulièrement complexe, il reflète cependant particulièrement bien les principaux problèmes auxquels sont soumis les skieurs alpins. Au regard de cette complexité, il semble intéressant de dépasser des facteurs de performance parcellarisés et hiérarchisés puisqu'ils sont tous particulièrement importants et interdépendants. Peut-être serait-il intéressant de changer de paradigme d'objectifs d'entraînement et d'objectif

unique de séance en préparation physique. Par exemple, si le développement des qualités physiologiques est dans une première partie de cycle envisagé comme objectif unique de séance, il semble fondamental pour faciliter le transfert de qualité vers la pratique du ski – et c'est cela qui prime – de croiser ensuite cet objectif purement physiologique avec les objectifs perceptivo-décisionnels, musculaires et pourquoi pas psychologique (si on ambitionne de sauter directement quelques paradigmes en avant). En bref, des objectifs d'entraînement spécifiques plus croisés et intégrés – donc plus transférables vers le ski alpin – sont préconisés.

2.2 - Affinage des contenus d'entraînement

La première partie de ce chapitre aborde, sans véritable hiérarchie, les potentielles pistes d'amélioration relatives aux contenus d'entraînements sur neige inspirées par les résultats de nos études.

Premièrement, les données relatives à la cinétique de $\dot{V}O_2$ montrent un temps de latence important du système cardio-respiratoire en début de manche. Comme l'implication des métabolismes énergétiques se compense, un temps de latence réduit de la production d'énergie métabolique par le métabolisme aérobie permettrait d'épargner une partie du fonctionnement du métabolisme glycolytique et l'accumulation de métabolites subséquentes délétères pour la contraction musculaire. Pour ce faire, un échauffement cardio-respiratoire plus qualitatif peut être mis en place. Les entraîneurs doivent redoubler d'imagination pour pallier aux contextes défavorables d'un départ de course et de chaussures de ski afin de mettre en route de manière appuyée le système cardio-respiratoire des skieurs, sans pour autant provoquer une acidose musculaire avant le départ. Les images télévisées d'ergocycle au départ de certaines pistes de Coupe du Monde devraient favoriser l'évolution culturelle nécessaire sur ce point.

Deuxièmement, l'observation de la fréquence ventilatoire, non développée dans ce manuscrit, montre chez une majorité de skieurs (jusqu'au niveau Coupe du Monde) des irrégularités suggérant des apnées durant le ski. Ces apnées sont principalement observées en SL, notamment dans les figures (double, triple, quadruple). En effet, les figures provoquent des changements de rythme auxquels la fréquence ventilatoire semble s'adapter. Les apnées peuvent également être observées lors de passages stratégiques tels que des ruptures de pente. De la même manière que l'effet d'un échauffement léger au niveau cardio-respiratoire, le muscle ayant moins d'O_2 disponible lors d'apnée est obligé d'utiliser davantage d'énergie métabolique fournie par le métabolisme glycolytique.

Troisièmement, pour un temps d'effort donné, [La] est significativement supérieure en SL par rapport au GS. Aussi, lorsque l'objectif d'entraînement sur neige est principalement

orienté sur des aspects techniques (ce qui est régulièrement le cas), les entraîneurs devraient veiller soit à tracer des SL dont la durée d'effort est plus courte que celle des GS, soit à limiter le nombre de manches en SL par rapport au GS pour une durée d'effort identique.

Ainsi, au niveau de l'entraînement sur les skis, améliorer les aspects cardio-respiratoires de l'échauffement, limiter les apnées durant les manches et adapter la durée de manche et/ou le nombre de manches aux contraintes des disciplines semblent être des voies de progrès relatives aux contenus d'entraînement du skieur alpin.

La seconde partie de ce chapitre aborde les potentielles pistes d'amélioration soulevées par nos travaux au niveau des contenus d'entraînement de préparation physique du skieur alpin. Tout d'abord, dans un souci de rationalisation, la culture de l'entraînement veut qu'une séance de préparation physique ait un objectif unique ou bien un enchaînement d'objectifs juxtaposés. Par exemple, on pourrait programmer, à la suite d'un échauffement, 30min de proprioception statique puis un bloc de PMA et enfin 30min de visualisation. Au regard de l'enchevêtrement et de l'interdépendance des facteurs de performance du ski alpin, ne serait-il pas plus pertinent de mêler deux ou trois objectifs d'entraînement au sein d'un même exercice plus complexe, plus proche de la complexité de l'activité pour laquelle le skieur se prépare ? Si la difficulté du skieur est de gérer les déséquilibres avec autant de précision jusqu'en fin de manche, ne serait-il pas pertinent alors, à mesure que la saison compétitive approche, d'augmenter le nombre de séances énergétiques combinant une gestion des déséquilibres ? Par exemple, dans un premier temps, pour développer la capacité glycolytique, l'athlète peut vivre des intensités élevées d'effort stimulant le métabolisme. Dans un second temps, il semble pertinent de proposer des contraintes d'entraînement proches ou légèrement plus difficiles que les contraintes compétitives. C'est-à-dire vivre des acidoses musculaires marquées, et non maximales (!) en conservant une précision spatio-temporelles de trajectoire et une gestion des déséquilibres. Ce type de contenu de séance de préparation physique semble plus transférable dans le contexte écologique du ski alpin que des acidoses maximales vécues à travers des motricités nécessairement appauvries en termes de contraintes perceptivo-décisionnelles.

Ainsi, la motricité du slide offrant des contraintes physiologiques spécifiques du ski alpin ainsi qu'une gestion des déséquilibres constitue un support d'entraînement particulièrement intéressant pour le skieur alpin. Cette base gestuelle permet des déclinaisons d'utilisation :

- En modulant la fréquence d'appuis et/ou la durée d'effort.
- En modulant la longueur de la planche de slide.

- En modulant le coefficient de friction de la planche à l'aide de lubrifiant en silicone.
- En utilisant des élastiques pour créer davantage de déséquilibres et/ou de contraintes musculaires.
- En utilisant des gilets lestés pour augmenter les contraintes musculaires.
- En utilisant une planche de slide octogonale permettant des appuis dans différentes directions.
- En plaçant la planche de slide sur une surface inclinée pour augmenter les contraintes mécaniques.
- En ajoutant des obstacles à éviter afin d'introduire de la variabilité perceptivo-décisionnelle.
- En inhibant plus ou moins les canaux perceptifs.

Si la motricité du slide est la plus spécifique du ski alpin parmi celles investiguées au cours de nos travaux, les bonds latéraux de part et d'autre d'une box (motricité du box test) ainsi que les bonds latéraux avec fréquence maximale sur trampoline olympique constituent également des motricités dont les contraintes physiologiques se rapprochent de celles du ski alpin. Ces deux motricités peuvent également être modulées de différentes manières. En revanche, les résultats de notre deuxième étude montrent que la course à pied et le cyclisme sont les motricités qui sont les moins spécifiques du ski alpin alors même qu'elles sont les plus utilisées dans le cadre de la préparation physique des skieurs. En effet, ces motricités - relativement pauvres en termes de contraintes perceptivo-décisionnelles - permettent aux athlètes de développer des puissances métaboliques très élevées sans risque élevé de chute ou de blessure. La course à pied et le cyclisme sont, de ce point de vue, intéressants pour constituer une première partie d'entraînement physiologique à distance de la saison compétitive. Pour autant, plus les premières échéances compétitives approchent moins la course à pied et le cyclisme semblent constituer des motricités pertinentes à utiliser dans le cadre de la préparation physique du skieur alpin. Ainsi, au niveau de la préparation physique des skieurs alpins, le transfert d'apprentissage des séances semble catalysé par l'utilisation de contenus d'entraînement intriqués plutôt que juxtaposés. Contrairement à la course à pied et au cyclisme, la motricité du slide est particulièrement pertinente à cet effet. C'est également le cas des bonds latéraux sur box et des bonds latéraux à fréquence maximale sur trampoline.

2.3 - Affinage du suivi de la charge d'entraînement

L'ambition d'optimiser le transfert d'apprentissage d'un entraînement plus spécifique vers le contexte écologique compétitif peut poser le problème culturel de la gestion de la dynamique des charges d'entraînement auprès des préparateurs physiques. En effet, plus un contenu d'entraînement est standardisé et aseptisé, plus il est facile d'en quantifier la charge externe d'entraînement. Comme le ski alpin est une discipline éminemment complexe, les contenus d'entraînement spécifiques sont également complexes. Aussi, la charge externe des entraînements sollicitant des motricités spécifiques est difficile à quantifier. Mais au final, est-ce si important de quantifier précisément la charge externe puisque celle-ci est vouée à être en permanence adaptée afin de cibler une charge interne précise ? Ce n'est, en effet, pas la contrainte que le préparateur physique pense imposer à l'athlète qui importe mais bien la contrainte vécue par l'athlète. Cette contrainte vécue (charge interne) varie indéniablement d'un athlète à l'autre et c'est elle qu'il faut s'employer à mesurer, pas la contrainte que le préparateur physique pense être juste (charge externe).

Différentes méthodes permettent d'appréhender la charge interne. Si les méthodes valides sont intéressantes, l'intérêt est décuplé lorsque ces outils sont utilisés de concert afin de croiser leurs résultats. Nous pourrions ici faire le parallèle entre une étude scientifique sur un sujet et une revue de questions sur ce même sujet. De par son prisme plus large, la seconde oriente nécessairement plus précisément les conclusions et les applications pratiques subséquentes. Dans le cas de la charge interne, il s'agit de moduler la charge externe à venir afin de provoquer une charge interne anticipée. L'enjeu est, si l'on augmente la charge interne, d'optimiser la progression, et si on l'augmente trop de risquer la blessure et le plafonnement voire la diminution des performances. Si l'on diminue la charge d'entraînement, le risque de blessure diminue mais si on la diminue trop les performances ne sont pas optimisées. Aussi, le préparateur physique est un équilibriste sur cette crête glissante entre optimisation de la performance d'un côté et gestion du risque de blessure de l'autre.

Notre troisième étude propose un outil spécifique du ski alpin qui semble pertinent (parmi d'autres non spécifiques) pour appréhender la charge interne d'entraînement d'un skieur. En effet, effectué de manière longitudinale, le 80s-slide-test donne des indices pertinents sur l'état de forme d'un skieur relativement aux qualités physiques sollicitées lors de la pratique compétitive. Le nombre total d'appuis et la cinétique du nombre d'appui toutes les 10s sont des indicateurs intéressants du point de vue de la charge interne. En effet, une différence de nombre total d'appuis de 2,17% atteste d'une évolution du résultat entre deux tests. L'index de fatigue, la RPE et Δ[La] sont des indicateurs modérément reproductibles dont les interprétations sont à

prendre avec davantage de distance. Il est important d'insister sur le fait qu'un éventuel mauvais résultat relatif au 80s-slide-test n'est pas alarmant quant à l'état de forme d'un skieur. Ça le serait si le faisceau d'indice émanant d'autres tests pertinents pour appréhender la charge interne indiquait la même tendance. Notre troisième étude montre également que des tests effectués en course à pied ou en cyclisme - tels que respectivement un 400m et des tests de Wingate – ne sont pas pertinents dans le cadre du suivi longitudinal de la charge interne puisque leurs contraintes ne sont pas spécifiques du ski alpin. Autrement dit, les qualités physiologiques que mesurent ces tests ne sont pas spécifiquement celles dont le skieur a besoin pour performer dans sa discipline.

Au-delà de sa pertinence théorique, le 80s-slide-test doit également être pratique d'utilisation. Le 80s-slide-test l'est dans la mesure où il est :

- Facile d'accès.
- D'un prix raisonnable.
- Facilement transportable.
- Facile et rapide à mettre en place.
- Sécuritaire.

De plus, lors des tests, les observables doivent être faciles d'accès et leur analyse rapide afin d'obtenir un feedback précis et immédiatement exploitable. En utilisant une caméra basique pour filmer le test, seulement 2-3 min sont nécessaires pour mesurer le nombre total d'appuis, le nombre d'appuis par tranche de 10s et l'index de fatigue.

En termes de contenu d'entraînement, il semble nécessaire d'accepter d'inclure de plus en plus de motricités spécifiques du ski alpin à mesure que les échéances compétitives approchent. Afin de ne pas perdre pied dans la gestion de la dynamique des charges, il semble salvateur de consacrer du temps à la mesure de la charge interne plutôt qu'à celle de la charge externe afin d'affiner, individualiser et anticiper les effets de l'entraînement. Dans cette perspective, l'utilisation du 80s-slide-test semble être pertinente. Elle doit s'accompagner de l'utilisation d'autres outils valides.

3 - Conclusion générale

Nous conclurons notre travail en revenant à des notions aussi fondamentales que basiques. Pour se préparer à performer en compétitions de ski alpin, il faut connaître leurs caractéristiques (études 1 et 4). Ainsi, ces caractéristiques peuvent constituer des objectifs d'entraînement. Derrière des objectifs d'entraînement, il faut solliciter des moyens d'optimiser leur atteinte, c'est-à-dire des contenus d'entraînement. La quantité de pratique ski au pied étant restreinte, il faut trouver d'autres moyens efficaces d'entraînement. Pour être pertinents ces contenus d'entraînement doivent être spécifiques de l'activité ski alpin (étude 2) afin de favoriser le transfert d'apprentissage de l'entraînement vers la compétition. Lorsqu'une activité sportive est aussi plurifactorielle que le ski alpin, il est souvent difficile de mesurer les bénéfices de l'entraînement sur la compétition. Toutefois, en utilisant longitudinalement un test physique spécifique du ski alpin (étude 3), il est possible de quantifier des améliorations de qualités pertinentes pour le ski alpin dont on peut penser que le skieur bénéficiera en compétition.

PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

1 - Étudier l'influence de la variabilité des caractéristiques du ski alpin sur les contraintes énergétiques

L'étude 1 a décrit les contraintes physiologiques lors de SL et GS chez des skieurs entraînés. Ces résultats permettent de fixer des objectifs d'entraînement énergétique généraux. Pour aller plus loin, il semble pertinent d'étudier l'influence de différents paramètres sur les contraintes énergétiques du ski alpin, tels que :

- Le niveau des skieurs (niveau Coupe du Monde-Coupe d'Europe vs skieur entraîné).
- La visibilité (soleil vs jour blanc).
- La qualité de neige (neige injectée vs neige artificielle vs neige naturelle vs neige salée).
- Le profil de la piste (très raide vs très plat).
- L'écart horizontal entre les portes.
- La discipline (DH vs SG vs GS vs SL vs SP).
- Le nombre de manches (1 vs 10 manches en SP, 1 vs 2 manches en SL, GS et DH).

En effet, dans la mesure où ces paramètres sont susceptibles d'influencer les contraintes mécaniques auxquelles le skieur fait face, il est probable que les contraintes physiologiques en soient également dépendantes.

2 - Poursuivre la compréhension de la gestion de la vitesse de course

L'étude 4 a permis d'appréhender la gestion de l'intensité de ski en lien avec la RPE au cours d'une manche longue de GS. Au-delà de la résultante de la technique de ski qu'est la vitesse de ski, il serait intéressant d'étudier l'évolution des caractéristiques cinétiques et cinématiques du skieur. En effet, la fatigue, ou son anticipation, pourrait amener le skieur à adapter sa motricité en vue de repousser la survenue de la fatigue et de diminuer le risque de chute. Le développement récent de capteurs de force non invasifs pour le ski et la fixation devrait permettre des études dans cette direction.

3 - Investiguer des motricités spécifiques en fonction des différentes disciplines

L'étude 2 a montré que la motricité du slide est la plus spécifique de SL et GS au niveau physiologique. Dans le prolongement de cette étude, il serait intéressant d'étudier :

- Un panel plus large de motricités potentiellement spécifiques.
- Ces motricités en objectivant les contraintes biomécaniques et perceptivo-décisionnelles.
- La spécificité de motricités par rapport au SG et à la DH.

Cela permettrait d'affiner les contenus d'entraînement spécifique en fonction des spécialités des skieurs.

4 - Investiguer le transfert de qualités physiologiques vers la pratique du ski alpin en incluant davantage de contraintes perceptives spécifiques dans le cadre de la préparation physique

L'analyse complexe du ski alpin montre l'indéniable entrelacement des facteurs de performance. Le 80s-slide-test (étude 3) pourrait permettre d'objectiver la pertinence de transfert de qualités physiologiques selon plusieurs modes d'entraînement :

- Séances énergétiques brutes.
- Séances énergétiques et proprioception statique en contexte de fatigue physiologique.
- Proprioception statique sans contexte de fatigue physiologique.
- Séances énergétiques et gestion des déséquilibres en glissement en contexte de fatigue physiologique.
- Gestion des déséquilibres en glissement sans contexte de fatigue physiologique.

Cette démarche permettrait d'appréhender la potentielle plus-value d'un entraînement physiologique incluant les contraintes perceptivo-décisionnelles caractéristiques du ski alpin. En effet, la RPE, dont dépend la gestion de l'intensité de ski, dépend des afférences physiologiques mais également des contraintes perceptivo-décisionnelles. Ainsi, le couplage de ces deux formes de contraintes au sein de séances d'entraînement laisse présager d'un meilleur transfert de qualités dans l'activité spécifique par rapport à des entraînements compartimentés. De plus, il semble intéressant de comparer le transfert d'apprentissage entre une proprioception statique très ancrée culturellement et des exercices de gestion des déséquilibres se rapprochant davantage des caractéristiques perceptivo-décisionnelles du ski alpin (Cf. fondamentaux du ski alpin, modèle FFS).

OUVERTURE

Si la recherche appliquée est un véritable challenge, qui plus est dans un milieu écologique hostile, il existe un challenge autrement plus compliqué qui est celui de la transmission des modestes connaissances vers les acteurs de terrain que sont les entraîneurs et les préparateurs physiques. Autrement dit, le chercheur peut s'affairer autant qu'il le peut/ souhaite, si le fruit de son travail n'est pas utilisé alors son travail perd de son sens.

L'hermétisme de la culture commune de terrain aux productions scientifiques relèverait d'un protectionnisme sous-tendu par des luttes de pouvoir. Plus l'athlète est entouré d'acteurs et plus leurs parts respectives d'accompagnement vers la potentielle performance est réduite. Aussi, chaque acteur défend plus ou moins consciemment sa position, son rang dans l'accompagnement de l'athlète. Une réflexion managériale d'envergure semble nécessaire pour lever ces luttes intestines freinant les avancées des athlètes à cause des frictions entre egos hypertrophiés caractérisant souvent les acteurs du sport de haut niveau.

A ce premier constat s'ajoute une méfiance exacerbée du monde scientifique émanant d'une hiérarchisation sociale et implicite des domaines de compétences. En effet, les disciplines «intellectuelles» jouiraient d'une gratification sociale (à notre sens nullement justifiée) qui aurait tendance à opposer ceux qui détiennent/créent le savoir à ceux qui ne le font pas. Ce construit social peut justifier le mécanisme de mise à distance du monde scientifique par les acteurs de terrain qui ne feraient potentiellement que protéger leur estime de soi tout en se préservant de remettre en cause les idées dont ils ont hérité ou qu'ils ont construites au gré de leur expérience.

De manière optimiste, une partie de l'avenir de l'optimisation de la performance sportive se jouerait autour de qualités humaines entre des hommes et des femmes prêts à prendre le temps de communiquer et partager bilatéralement autour de préoccupations sportives communes malgré leurs différences culturelles. Plutôt que d'avoir peur que l'on nous fasse de l'ombre, enrichissons-nous donc des compétences des gens qui nous entourent !

REFERENCES

1. Abbiss CR, Laursen PB (2008) Describing and understanding pacing strategies during athletic competition. Sports Med; 38:239-252.
2. Abe T, Kawakami Y, Ikegawa S, Kanehisa H, Fukunaga T (1992) Isometric and isokinetic knee joint performance in Japanese alpine ski racers. J Sports Med Phys Fitness; 32(4):353-7.
3. Abernethy B, Russell DG (1987) Expert in an applied selective attention task. Journal of Sport Psychology; 9:326-345.
4. Ahlborg G, Hagenfeldt L, Wahren J (1975) Substrate utilization by the inactive leg during one-leg or arm exercise. Journal of Applied Physiology; 39(5): 718-723.
5. Albertus Y, Tucker R, St Clair Gibson A, Lambert EV, Hampson DB, Noakes TD (2005) Effect of distance feedback on pacing strategy and perceived exertion during cycling. Med Sci Sports Exerc; 37:461-468.
6. Alhakami AS, Slovic P (1994) A psychological study of the inverse reltionship between perceived risk and perceived benefit. Risk analysis; 14(6):1085-96.
7. Allen DG, Lamb GD, Westerblad H (2008) Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. Physiol Rev; 88:287-332.
8. Amann M, Secher NH (2010) Counterpoint : afferent feedback from fatigued locomotor muscles is not an important determinant of endurance exercise performance. J Appl Physiol; 108:454-6.
9. Andersen RE, Montgomery DL (1988) Physiology of Alpine skiing. Sports Med; 6(4):210-21.
10. Andersen RE, Montgomery DL, Turcotte RA (1990) An onsite test battery to evaluate giant slalom skiing performance. J Sports Med Phys Fitness; 30(3):276-82.
11. Andreacci JL, LeMura LM, Cohen SL, Urbansky EA, Chelland SA, Von Duvillard SP (2002) The effects of frequency of encouragement on performance during maximal exercise testing. J Sports Sci; 20: 345–352.
12. Ansley L, Robson PJ, St Clair Gibson A, Noakes TD (2004) Anticipatory pacing strategies during supramaximal exercise lasting longer than 30 s. Med Sci Sports Exerc; 36:309-314.
13. Åstrand PO, Rodahl K (1970) Texbook of work physiology. New York: Mc Graw-Hill.
14. Åstrand PO, Hultman E, Juhlin-Dannfelt A, Reynolds G (1986a) Disposal of lactate during and after strenuous exercise in humans. Journal of Applied Physiology; 61(1):338-343.
15. Astrand PO, Rodhal K (1986b) Textbook of work physiology. New York, McGraw-Hill; 666-667.
16. Babiel S, Hartmann U, Spitzenpfeil P, Mester J (1997) Ground-reaction forces in alpine skiing, cross-country skiing and ski jumping. in Müller et al., Science and skiing; 200-207.
17. Bach DR, Dolan RJ (2012) Knowing how much you don't know: a neural organization of uncertainty estimates. Nat Rev Neurosci; 13:573-86.
18. Bacharach DW, von Duvillard SP (1995) Intermediate and long-term anaerobic performance of elite Alpine skiers. Med. and Sci. Sports Exerc; 27:305-309.
19. Bacharach DW, Bacharach KJ (2009) Diet and muscle fatigue during two weeks of alpine ski training. in Müller et al., Science and skiing; 75-87.

20. Baden DA, McLean TL, Tucker R, Noakes TD, St Clair Gibson A (2005) Effect of anticipation during unknown or unexpected exercise duration on rating of perceived exertion, affect, and physiological function. Br J Sports Med; 39:742-746.
21. Bahr R, Krosshaug T (2005) Understanding injury mechanisms: a key component of preventing injuries in sports. Br J Sports Med; 39:324-329.
22. Bailey SJ, Vanhatalo A, Wilkerson DP, Dimenna FJ, Jones AM (2009) Optimizing the ''priming'' effect: influence of prior exercise intensity and recovery duration on O_2 uptake kinetics and severe-intensity exercise tolerance. J Appl Physiol; 107:1743-1756.
23. Bangsbo J, Gollnick PD, Graham TE, Juel C, Kiens B, Mizuni M, Saltin B (1990) Anaerobic energy production and O_2 deficit-debt relationship during exhaustive exercise in humans. Journal of Physiology; 422: 539-559.
24. Bangsbo J, Michalsik L, Petersen A (1993) Accumulated O_2 deficit during intense exercise and muscle characteristics of elite athletes. Int J Sports Med; 14: 207-213.
25. Bangsbo J, Graham T, Johansen L, Saltin B (1994) Muscle lactate metabolism in recovery from intense exhaustive exercise: impact of light exercise. J Appl Physiol; 77:1890–1995.
26. Bangsbo J, Madsen K, Kiens B, Richter EA (1996) Effect of muscle acidity on muscle metabolism and fatigue during intense exercise in man. J Physiol; 495:587-596.
27. Baron B, Deruelle F, Moullan F, Dalleau G, Verkindt C, Noakes TD (2009) The eccentric muscle loading influences the pacing strategies during repeated downhill sprint intervals. Eur J Appl Physiol; 105:749-757.
28. Baron B, Moullan F, Deruelle F, Noakes TD (2011) The role of emotions on pacing strategies and performance in middle and long duration sport events. Br J Sports Med; 45:511-517.
29. Batterham AM, Hopkins WG (2006) Making meaningful inferences about magnitudes. International journal of sports physiology and performance; 1(1):50-57.
30. Baum K, Hoy S, Leyk D, Essfeld D (1997) An incremental exercise test simulating the muscular activity of slalom. in Müller et al. Sciences and skiing; 479- 486.
31. Behm DG, Wahl MJ, Button DC (2005) Relationship between hockey skating speed and selected performance measures. J Strength Cond Res; 19(2):326-31.
32. Bell GJ, Wenger HA (1988) The effect of one-legged sprint training on intramuscular pH and nonbicarbonate buffering capacity. Eur J Appl Physiol and Occup Physiol; 58(1):158-164.
33. Beneke R, Hutler M, Leithauser RM (2007) Anaerobic performance and metabolism in boys and male adolescents. Eur J Appl Physiol; 101(6):671-677.
34. Benoit H, Busso T, Castells J, Devis C, Geyssant A (1995) Influence of hypoxic ventilatory response on arterial O_2 saturation during maximal exercise in acute hypoxia. Eur J Appl Physiol; 72:101-105.
35. Bere T, Florenes TW, Krosshaug T, Koga H, Nordsletten L, Irving C, Muller E, Reid RC, Senner V, Bahr R (2011) Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in World Cup alpine skiing: a systematic video analysis of 20 cases. Am J Sports Med; 39:1421-1429.
36. Bere T, Florenes TW, Nordsletten L, Bahr R (2013a) Sex differences in the risk of injury in World Cup alpine skiers : a 6-year cohort study; 48(1):36-40.
37. Bere T, Florenes TW, Krosshaug T, Haugen P, Svandal I, Nordsletten L, Bahr R (2013b) A systematic video analysis of 69 injury cases in World Cup alpine skiing. Scand J Med Sci Sports; 24(4):667-677.
38. Berg HE, Eiken O, Tesch PA (1995) Involvement of eccentric muscle actions in giant slalom racing. Med Sci Sports Exerc; 27:1666-1670.

39. Berg HE, Eiken O (1999) Muscle control in elite alpine skiing. Med Sci Sports Exerc; 31:1065-1067.
40. Bergstrsom KA, Askild O, Jsrgensen NA, Ekeland A (1999) Evaluation of skiing injuries by Injury Severity Score. Scand J Med Sci Sports; 9:110-1.
41. Bertuzzi R, Melegati J, Bueno S Ghiarone T, Pasqua LA, Fernandes Gaspari A, Lima-Silva AE, Goldman A (2016) GEDAE-LaB: a free software to calculate the energy system contributions during exercise, PLoS ONE 11(1):e0145733.
42. Billat VL, Demarle A, Slawinski J, Paiva M, Koralsztein JP (2001) Physical and training characteristics of top-class marathon runners. Med Sci Sports Exerc; 33: 2089-2097.
43. Bishop D, Bonetti D, Dawson B (2001a) The effect of three different warm-up intensities on kayak ergometer performance. Med Sci Sports Exerc; 33(6):1026-1032.
44. Bishop D, Spencer M, Duffield R, Lawrence S (2001b) The validity of a repeated sprint ability test. J Sci Med Sport; 4(1):19-29.
45. Bishop D, Bonetti D, Dawson B (2002) The influence of pacing strategy on VO_2 and supramaximal kayak performance. Med Sci Sports Exerc; 34:1041-1047.
46. Bishop D (2003a) Warm up I: potential mechanisms and the effects of passive warm up on exercise performance. Sports Med; 33:439-454.
47. Bishop D (2003b) Warm up II: performance changes following active warm up and how to structure the warm up. Sports Med; 33:483-498.
48. Bishop D (2008) An Applied Research Model for the Sport Sciences. Sports Med; 38(3):253-263.
49. Bjerke O, Loras H, Pedersen AV (2016) Variations of the relative age effect within and across groups in elite alpine skiing. Comprehensive Psychology; 5:1-6.
50. Bjerke O, Vorland Pedersen A, Aune TK, Loras H (2017) An inverse relative age effect in male alpine skiers at the absolute top level. Frontiers in psychology; 8(1210).
51. Blanchfield AW, Hardy J, de Morree HM, Staiano W, Marcora SM (2014) Talking Yourself out of Exhaustion: The Effects of Self-Talk on Endurance Performance, Medicine & Science in Sports & Exercise; 46(5):998-1007.
52. Bogdanis GC, Nevill ME, Boobis LH (1996) Contribution of phosphocreatine and aerobic metabolism to energy supply during repeated sprint exercise. J Appl Physiol; 80(3):876-84.
53. Bonaventura JM, Sharpe K, Knight E, Fuller KL, Tanner RK, Gore CJ (2015) Reliability and Accuracy of Six Hand-Held Blood Lactate Analysers. Journal of Sports Science and Medicine; 14:203-214.
54. Bonde-Petersen F, Knuttgen H, Henrickson J (1972) Muscle metabolism during exercise with concentric and eccentric con- tractions. J Appl Physiol; 33:792 – 795.
55. Boobis L, Williams C, Wootton SA (1982) Human muscle metabolism during brief maximal exercise. J Physiol; 338:21-22.
56. Borg G (1970) Perceived exertion as an indicator of somatic stress. Scand J Rehabil Med; 2:92-98.
57. Bosco C, Luhtanen P, Komi PV (1983) A simple method for measurement of mechanical power in jumping. Eur J Appl Physiol; 50:273-282.
58. Bosco C, Cotelli F, Bonomi R, Mognoni P, Roi GS (1994), Seasonal fluctuations of selected physiological characteristics of elite alpine skiers. Eur J Appl Physiol Occup Physiol; 69(1)71-4.
59. Bosco C (1996) Evaluation and planning of conditioning training for alpine skiers. in Müller et al., Sciences and skiing. 229-250.
60. Bouchard C, Taylor AW, Simoneau JA, Dulac S (1991) Testing anaerobic power and capacity. in Physiological testing of the high-performance athlete. Eds: MacDougal JD,

Wenger HA, Green HJ. 2nd edition. Champaign: Human Kinetics; 175-221.
61. Bourdieu P, Passeron (1964) Les héritiers : les étudiants et la culture. Paris, Les éditions de Minuit.
62. Boyer SJ, Blume FD (1984) Weight loss and changes in body composition at high altitude. J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol; 57(5):1580-5.
63. Boyer KA, Nigg BM (2007) Quantification of the input signal for soft tissue vibration during running. J biomech; 40(8):1877-80.
64. Breil FA, Weber SN, Koller S, Hoppeler H, Vogt M (2010) Block training periodization ine alpine skiing ; effect of 11-day HIT on VO_{2max} and performance. Eur J Appl Physiol; 109(6):1077-86.
65. Bret C, Messonnier L, Nouck Nouck JM, Freund H, Dufour AB, Lacour JR (2003) Differences in lactate exchange and removal abilities in athletes specialised in different track running events (100 to 1500m). Int J Sports Med; 24:108-113.
66. Brooks GA (1986a) Lactate production under fully aerobic conditions: the lactate shuttle during rest and exercise. Federation Proceedings; 45(13):2924-29.
67. Brooks G.A (1986b) The lactate shuttle during exercise and recovery. Medicine and Science in Sports and Exercise; 18(3):360-368.
68. Brooks GA (1991) Current concepts in lactate exchange. Medicine and Science in Sports and Exercise; 23(8):895-906.
69. Brooks GA (2000) Intra- and extra-cellular lactate shuttles. Medicine and Science in Sports and Exercise; 32(4):790-799.
70. Brown SL, Wilkinson JG (1983) Characteristics of national, divisional, and club male alpine ski racers. Med Sci Sports Exerc; 15(6):491-5.
71. Bruyn-Prevost P, Lefebvre F (1980) The effects of various warming up intensities and durations during a short maximal anaerobic exercise. Eur J Appl Physiol; 43:101-7.
72. Buchfuhrer MJ, Hansen JE, Robinson TE, Sue DY, Wasserman K, Whipp BJ (1983) Optimizing the exercise protocol for cardiopulmonary assessment. J Appl Physiol; 55: 1558-1564.
73. Burnley M, Jones AM, Carter H, Doust JH (2000) Effects of prior heavy exercise on phase II pulmonary oxygen uptake kinetics during heavy exercise. J Appl Physiol; 89: 1387-1396.
74. Burnley M, Doust JH, Ball D, Jones AM (2002) Effects of prior heavy exercise on VO_2 kinetics during heavy exercise are related to changes in muscle activity. J Appl Physiol; 93:167-174.
75. Burnley M, Davison G, Baker JR (2011) Effects of priming exercise on VO_2 kinetics and the power-duration relationship. Medicine and science in sports and Exercise; 43: 2171-2179.
76. Burtscher M, Raschner C, Zallinger G, Schwameder H, Müller E (2000) Comparison of cardiorespiratory and metabolic responses during conventional and carving skiing. in Müller et al., Science and skiing; 2:54-55.
77. Buskirk ER, Kollias J, Akers RF, Prokop EK, Reategui EP (1967) Maximal performance at altitude and on return from altitude in conditioned runners. J Appl Physiol; 23:259-266.
78. Calbet JA, Boushel R, Radegran G, Sondergaard H, Wagner PD, Saltin B (2003) Determinants of maximal oxygen uptake in severe acute hypoxia. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol; 284:291-303.
79. Capelli C, Termin B, Pendergast DR (1998) Energetics of swimming at maximal speed in humans. Eur J Appl Physiol; 78:385-393.
80. Carter H, Pringle JS, Jones AM, Doust JH (2002) Oxygen uptake kinetics during treadmill running across exercise intensity domains. Eur J Appl Physiol; 4:347-354.

81. Castro-Sánchez M, Zurita-Ortega F, Chacón-Cuberos R, López-Gutiérrez CJ, Zafra-Santos E (2018) Emotional Intelligence, Motivational Climate and Levels of Anxiety in Athletes from Different Categories of Sports: Analysis through Structural EquationsInt. J. Environ. Res. Public Health; 15.
82. Cigrovski V, Radman I, Konter E, Ocic M, Ružic L (2018) Sport Courage, Worry and Fear in Relation to Success of Alpine Ski Learning. Sports; 6(96).
83. Cisek P, Kalaska JF (2010) Neural mechanisms for interacting with a world full of action choices. Annu Rev Neurosci; 33:269-98.
84. Chapman RF, Emery M, Stager JM (1999) Degree of arterial desaturation in normoxia influences VO_{2max} decline in mild hypoxia. Med Sci Sport Exerc; 31:658-663.
85. Chapman DW, Needham KJ, Allison GT (2008) Effect of experience in a dynamic environment on postural control. Br J Sports Med; 42(1):16-21.
86. Cherniakov IN, Maksimov IV (1967) Dehydration of the human organism at high altitudes. Voen Med Zh; 3:62-4.
87. Code du Travail (Article R. 4441-2).
88. Congrès FIS (2018) Long term calendar World Cup Alpine.
89. Costill DL, Fink WJ, Pollock ML (1976) Muscle fiber composition and enzyme activities of elite distance runners. Med Sci Sports; 8:96-100.
90. Coulmy N, Antichan F, Reinish (2010) Effect of different movement strategies on tangential and perpendicular velocity of skis and plantar pressure in slalom skiing. G. XV annual congress of the european college of sport science. Antalya/ Turkey.
91. Coulmy N (2011) Ski de competition et contraction musculaire. Colloque AFESA-FFS.
92. Coulmy N (2014) Identification des caractéristiques discriminantes de la performance par analyse statistique longitudinale chez le skieur alpin de haut niveau. Rapport interne Département Sportif et Scientifique, Fédération Française de Ski.
93. Cox RH (2002) Sport psychology: Concepts and applications (5th edn.). New York: McGraw Hill.
94. Craig NP, Norton KI (2001) Characteristics of Track Cycling. Sports Med; 31(7):457-468.
95. Crestani L (2012) thèse de Medecine, Epidémiologie des accidents de ski alpin en équipe de France : étude retrospective de 1994 à 2011.
96. Cury F, Sarrazin P (2000) Efforts et buts d'accomplissement, in Delignières D, L'effort.
97. Dahan S, Blanchi-Rousseaux MP, Chambat P, Merino JF (2005) Ruptures du LCA dans les équipes de France de ski de 1980 à 2000. Document du Département Sportif et Scientifique de la FFS.
98. Dal Pupo J, Gheller RG, Dias JA, Rodacki ALF, Moro ARP, Santos SG (2014) Reliability and validity of the 30-s continuous jump test for anaerobic fitness evaluation. Journal of Science and Medicine in Sport; 17:650-655.
99. Davey A, Endres NK, Johnson RJ, Shealy JE (2019) Alpine Skiing Injuries. Sports Health; 11(1):18-26.
100. Davidson TM, Laliotis AT (1996) Alpine skiing injuries: a nine-year study. West J Med; 164:310-314.
101. Dawson B, Goodman C, Lawrence S (1997) Muscle phosphocreatine repletion following single and repeated short sprint efforts. Scand J Med Sci Sports; 7:206-13.
102. de Ruiter CJ, Goudsmit JFA, Van Tricht JA, De Haan A (2007) The isometric torque at which knee-extensor muscle reoxygenation stops. Med Sci Sports Exerc; 39:443-452.
103. de Koning JJ, Foster C, Bakkum A, Kloppenburg S, Thiel C, Joseph T, Cohen J, Porcari JP (2011) Regulation of pacing strategy during athletic competition. PloS one; 6(1):e15863.

104. Deci EL, Ryan RM (2002) Handbook of self-determination research. The University of Rochester Press, Rochester, NY.
105. Delignières D (1993) Risque préférentiel, risque perçu et prise de risque. In J.P. Famose (Ed.), Cognition et performance. Paris: INSEP; 79-102.
106. Develay M (1996) Donner du sens à l'école. Paris ESF.
107. di Prampero PE (1981) Energetics of muscular exercise, Rev. Physiol. Biochem. Pharmacol 89.
108. di Prampero PE, Capelli C, Pagliaro P, Antonutto G, Girardis P, Zamparo P, Soule RG (1993) Energetics of best performances in middle-distance running. J. Appl. Physiol; 74(5):2318-2324.
109. di Prampero PE, Ferretti G (1999) The energetics of anaerobic muscle metabolism : a reappraisal of older and recent concepts. Resp. Physiol; 118:103-115.
110. di Prampero PE (2003) Factors limiting maximal performance in humans. Eur J Appl Physiol; 90:420-429.
111. Dill DB, Evans DS (1970) Report barometric pressure. J Appl Physiol; 29:914-916.
112. Dill DB, Costill DL (1974) Calculation of percentgae changes in volumes of blood, plasma, and red cells in dehydration. J of applied physiol; 37(2):247-248.
113. Dobson GP, Yamamoto E, Hochachka PW (1986) Phosphofructokinase control in muscle : nature and reversal of pH-dependent ATP inhibition. Am J Physiol; 250(19):71-76.
114. Duffield R, Dawson B, Goodman C (2004) Energy system contribution to 100-m and 200-m track running events. J Sci Sport; 7(3):302-13.
115. Duffield R, Dawson B, Goodman C (2005) Energy system contribution to 400-metre and 800-metre track running. J Sports Sci; 23(3):299-307.
116. Durnin JVGA, Passmore R (1967) Energy, work and leisure. Heinemann Educational, London.
117. Durstine JL, Pate RR, Sparling PB, Wilson GE, Senn MD, Bartoli WP (1987) Lipid, lipoprotein, and iron status of elite women distance runners. Int J Sports Med; 8(2):119-123.
118. Eloranta V, Komi PV (1981) Function of the quadriceps femoris muscle under the full range of forces and differing contraction velocities of concentric work. EMG and Clinical Neurophysiology; 21:419-431.
119. Eriksson, E, Nygaard E, Saltin, B (1977) Physiological demands in downhill skiing. The Physician and Sportsmedicine; 5:29-37.
120. Eriksson A, Forsberg A, Nilsson J, Karlsson J (1978) Muscle strength, EMG activity, and oxygen uptake during downhill skiing. Biomechanics; 54-61.
121. Falda-Buscaiot T, Hintzy F, Rougier P, Lacouture P, Coulmy N (2017) Influence of slope steepness, foot position and turn phase on plantar pressure distribution during giant slalom alpine ski racing. PLoS ONE; 12(5): e0176975.
122. Fasel B, Lechot C, Spörri J, Müller E, Aminian K (2016) Body vibration and its transmission in alpine ski racing. Infoscience.epfl.ch.
123. Faulhaber M, Raschner C, Flatz M, Burtscher M (2007) Aerobic capacity and race time in young alpine ski racers. St Christoph, Austrial: IVth International Congress on Science and Skiing.
124. Faulkner JA, Roberts DE, Elk RL, Conway J (1971) Cardiovascular responses to submaximal and maximal effort cycling and running. J Appl Physiol; 30:457-461.
125. Faulkner J, Parfitt G, Eston R (2008) The rating of perceived exertion during competitive running scales with time. Psychophysiology; 45:1077-85.
126. Federolf P (2005) Finite element simulation of a carving snow ski. Unpublished

doctpral dissertation, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zürich, Switzerland.
127. Federolf P, Scheiber P, Rauscher E, Schwameder H, Lüthi A, Rhyner HU, Müller E (2008) Impact of skier actions on the gliding times in alpine skiing. Scand J Med Sci Sports; 18 :790-797.
128. Federolf P, von Tscharner V, Haeufle D, Nigg B, Gimpl M, Müller E (2009) Vibration exposure in alpine skiing and consequences for muscle activation levels. in Müller, Science and skiing; 19-25.
129. Ferguson RA (2009) Limitations to performance during alpine skiing. Exp Physiol; 95(3):404-410.
130. Ferro A, Rivera O, Pagola I, Ferreruela M, Martin A, Rocandio V (2001) Biomechanical analysis of the 7th World Championships in Athletics Seville 1999. News studies in athletics; 16:25-60.
131. Fetz F (1997) A profile of sensorimotor balance of alpine skiers. in Müller et al., Sciences and skiing; 358-371.
132. Figueiredo P, Zamparo P, Sousa A, Vilas-Boas JP, Fernandes RJ (2011) An energy balance of the 200 m front crawl race. Eur J Appl Physiol; 111:767-777.
133. Finucane ML, Alhakami A, Slovic P, Johnson SM (2000) The affect heuristic in judgments of risks and benefits. Journal of Behavioral Decision Making; 13:1.
134. Florenes TW, Nordsletten L, Heir S, Behr R (2010) Injuries among World Cup ski and snowboard athletes. Scand J Med Sci Sports; 22(1): 58-66.
135. Foster C, Snyder AC, Thompson NN, Green MA, Foley M, Schrager M (1993) Effect of pacing strategy on cycle time trial performance. Med Sci Sports Exerc; 25: 383-388.
136. Foster C, Rundell KW, Snyder AC, Stray-Gundersen J, Kemkers G, Thometz N, Broker J, Knapp E (1999) Evidence for restricted muscle blood flow during speed skating. Med Sci Sports Exerc; 31:1433-1440.
137. Foster C, de Koning JJ, Hettinga F, Lampen J, Dodge C, Bobbert M, Porcari JP (2004) Effect of competitive distance on energy expenditure during simulated competition. Int J Sports Med; 25:198-204.
138. Foster C, Hendrickson KJ, Peyer K, Reiner B, deKoning JJ, Lucia A, Battista RA, Hettinga FJ, Porcari JP, Wright G (2009) Pattern of developing the performance template. Br J Sports Med; 43:765-769.
139. Freund H, Zouloumian P, Oyono-Enguelle S, Lampert E (1984) Lactate kinetics after maximal exercise in man. Medicine and Sport Science; 17:9-24.
140. Froelicher VF, Brammel H, Davis GD, Noguera I, Stewart A, Lancaster MC (1974) A comparison of three maximal treadmill exercise protocols. J. Appl. Physiol; 36:720-725.
141. Fulco CS, Rock PB, Cymerman A (1998) Maximal and submaximal exercise performance at altitude. Aviat Space Environ Med; 69:793-801.
142. Gabbett TJ, Domrow N (2005) Risk factors for injury in subelite rugby league players. Am J Sports Med; 33(3):428-34.
143. Gaesser GA, Brooks GA (1984) Metabolic bases of excess post-exercise oxygen consumption: a review. Med Sci Sports Exerc; 16(1):29-43.
144. Gaesser GA, Poole DC (1996) The slow component of oxygen uptake kinetics in humans. Exercise and Sport Sciences Reviews; 24:35-70.
145. Gaitanos GC, Williams C, Boobis LH (1993) Human muscle metabolism during intermittent maximal exercise. J Appl Physiol; 75(2):712-9.

146. Gastin PB, Lawson DL (1994) Influence of training status on maximal accumulated oxygen deficit during all-out cycle exercise. Eur J Appl Physiol; 69:321-330.
147. Gastin PB (2001) Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. Sports Med; 31(10):725-741.
148. Gastin PB, Meyer D, Huntsman E, Cook J (2015) Increase in injury risk with low body mass and aerobic-running fitness in elite Australian football. International Journal of Sports Physiology and Performance; 10:458-463.
149. Gavin TP, Derchak PA, Stager JM (1998) Ventilation's role in the decline in VO_{2max} and SaO_2 in acute hypoxic exercise. Med Sci Sport Exerc 30:195-199.
150. Genovely H, Stamford BA (1982) Effects of prolonged warm-up exercise above and below anaerobic threshold on maximal performance. Eur J Appl Physiol; 48:323-30.
151. Gerbino A, Ward SA, Whipp BJ (1996) Effects of prior exercise on pulmonary gas-exchange kinetics during high-intensity exercise in humans. Journal of Applied Physiology; 80:99-107.
152. Gibson JJ (1958) Visually controlled locomotion and visual orientation in animals. Gen Psych; 49(3):182-194.
153. Gibson JJ (1977) The concept of affordances. in: Shaw R, Bransford J, editors. Perceiving, acting, and knowing. Hillsdale: NJ: Erlbaum; 67-82.
154. Gibson JJ (1979) The ecological approach to visual perception. Boston: Houghton Mifflin.
155. Gilgien M, Spörri J, Chardonnens J, Kröll J, Müller E (2013) Determination of External Forces. in Alpine Skiing Using a Differential Global Navigation Satellite System Sensors; 13:9821-35.
156. Gilgien M (2014) Characterisation of skiers' mechanics, course setting and terrain geomorphology in world cup alpine skiing using Global Navigation Satellite Systems. Dissertation, Norwegian school of sport sciences, Oslo, Norway.
157. Gilgien M, Spörri J, Kröll J, Crivelli P, Müller E (2014) Mechanics of turning and jumping and skier speed are associated with injury risk in men's World Cup alpine skiing: a comparison between the competition disciplines. British Journal of Sports Medicine; 48:742-747.
158. Gilgien M, Kröll J, Spörri J, Crivelli P, Müller E (2018) Application of dGNSS in Alpine Ski Racing: Basis for Evaluating Physical Demands and Safety. Front. Physiol. 9:145. doi: 10.3389/fphys.2018.00145.
159. Giovanis VF, Yiaghis FA, Vasileiou PV (2018) Topographic recording of the Slalom racing route in snow. Pedagogics, psychology, medical-biological problems of physical training and sports; 22(1):4-10.
160. Glaister M (2005) Multiple sprint work: physiological responses, mechanisms of fatigue and the influence of aerobic fitness. Sports Med; 35:757-777.
161. Gollnick PD, Armstrong RB, Sembrowich WL (1973) Glycogen depletion pattern in human skeletal muscle fibres after heavy exercise. J Appl Physiol; 34(5): 615-30.
162. Golomer E, Cremieux J, Dupui P (1999) Visual contribution to self-induced body sway frequencies and visual perception of male professional dancers. Neurosci Lett; 267:189-92.
163. Gonzalez-Alonso J, Calbet JA, Nielsen B (1998) Muscle blood flow is reduced with dehydration during prolonged exercise in humans. J Physiol; 513(3):895-905.
164. Gore CJ, Hahn AG, Scroop GC, Watson DB, Norton KI, Wood RJ, Campbell DP, Emonson DL (1996) Increased arterial desaturation in trained cyclists during

maximal exercise at 580 m altitude. J Appl Physiol; 80:2204-10.
165. Gore CJ, Little SC, Hahn AG, Scroop GC, Norton KI, Bourdon PC, Woolford SM, Buckley JD, Stanef T, Campbell DP, Watson DB, Emonson DL (1997) Reduced performance of male and female athletes at 580 m altitude. Eur J Appl Physiol Occup Physiol; 75:136-143.
166. Granier P, Mercier B, Mercier J, Anselme F, Prefaut C (1995) Aerobic and anaerobic contribution to Wingate test performance in sprint and middle-distance runners. Eur J Appl Physiol; 70:58-65.
167. Grenier JG, Hintzy F, Antichan F, Coulmy N (2012) Energy expenditure and respective implications of the lactic and aerobic sources over a giant slalom in young ski racers. Sciences et Sports; 28:29-35.
168. Griffin MJ (1975) Vertical vibration of seated subjects : effects of posture, vibration level, and frequency. Aviation space and envrionmental medicine; 46(3):269-276.
169. Gross MA, Breil FA, Lehmann AD, Hoppeler H, Vogt M (2009) Seasonal variation of VO_{2max} and the $VO_{2\text{-work}}$ rate relationship in elite alpine skiers. Med Sci Sports Exerc; 41:2084-9.
170. Gross M, Hemund K, Vogt M (2014) High intensity training and energy production during 90-second box jump in junior alpine skiers. J Strength Cond Res; 28(6):1581-87.
171. Gross M, Bieri K, Hoppeler H, Norman B, Vogt M (2015) Beta-alanine supplementation improves jumping power and affects severe-intensity performance in professional alpine skiers. Int J Sport Nutr Exer Metab; 24:665-673.
172. Gutin B, Stewart K, Lewis S, Kruper J (1976) Oxygen consumption in the first stages of strenuous work as a function of prior exercise. Sports Med Phys Fitness; 16:60-65.
173. Haïda A, Coulmy N, Dor F, Antero-Jacquemin J, Marc A, Ledanois T, Tourny C, Rousseaux-Blanchi MP, Chambat P, Sedeaud A, Toussaint JF (2015) Return to Sport Among French Alpine Skiers After an Anterior Cruciate Ligament Rupture: Results From 1980 to 2013. The Am J of Sports Med; 44(2):324-30.
174. Haller T (2007) Akute lokale Wirkung und Mechanismen der Reaktion des Muskels auf Vibration. Unpub. Diploma Thesis German Sport University Cologne.
175. Haman F, Peronnet F, Kenny GP, Massicotte D, Lavoie C, Scott C, Weber JM (2002) Effects of cold exposure on fuel utilization in humans: Plasma glucose, muscle glycogen, and lipids. J Appl Physiol; 93:77-84.
176. Hampson DB, St Clair Gibson A, Lambert MI, Dugas JP, Lambert EV, Noakes TD (2004) Deception and perceived exertion during high-intensity running bouts. Percept Mot Skills; 98:1027-38.
177. Hanon C, Lepretre PM, Bishop D, Thomas C (2010) Oxygen uptake and blood metabolic responses to a 400-m run. Eur J Appl Physiol; 109(2):233-240.
178. Harris C, Edwards RHT, Hultman E (1976) The time course of phosphorylcreatine resynthesis during recovery of the quadriceps muscle in man. Pflugers Arch; 367:137-42.
179. Hather BM, Tesch PA, Buchanan P, Dudley GA (1991) Influence of eccentric actions on skeletal muscle adaptations to resistance training. Acta Physiol Scand; 143: 177-185.
180. Haymes EM, Dickinson AL (1980) Characteristics of elite male and female ski racers. Med Sci Sports Exerc; 12(3):153-8.

181. Hebestreit H, Meyer F, Htay H, Heigenhauser GJ, Bar-Or O (1996) Plasma metabolites, volume and electrolytes following 30-s high-intensity exercise in boys and men. Eur J Appl Physiol; 72:563-569.
182. Heil D, Wilcox A, Quinn C (1995) Cardiorespiratory responses to seat tube variation during steady state cycling. Med Sci Sports Exerc; 27:730-5.
183. Henriksson T, Vescovi JD, Fjellman-Wiklund A, Gilenstam K (2016) Laboratory- and field-based testing as predictors of skating performance in competitive-level female ice hockey. Journal of Sports Medicine; 7.
184. Hermansen L (1969) Anaerobic energy release. Med Sci Sports; 1(1):32-8.
185. Hermansen L, Vaage O (1977) Lactate disappearance and glycogen synthesis in human muscle after maximal exercise. American Journal of Physiology; 233(5):422-429.
186. Hettinga FJ, de Koning JJ, Hulleman M, Foster C (2009) Relative importance of pacing strategy and mean power output in 1500-m self-paced cycling. Br J Sports Med; 46(1):30-35.
187. Hill AV, Lupton H (1923) Muscular exercise, lactic acid and the supply and utilization of oxygen. Q J Med; 16:135-71.
188. Hill DW (1999) Energy system contributions in middle-distance running events. J Sports Sci; 17(6):477-83.
189. Hintermeister RA, Lange GW, O'Connor DD, Dillman CJ, Steadman JR (1994) Muscle activity of the inside and outside leg in slalom and giant-slalom skiing. Medicine Science in Sports Exercise; 27(5):S228.
190. Hintermeister RA, O'Connor DD, Dillman CJ, Suplizio CL, Lange GW, Steadman JR (1995) Muscle activity in slalom and giant slalom skiing. Med Sci Sports Exerc; 27:315-22.
191. Hintermeister RA, O'Connor DD, Lange GW, Dillman CJ, SteadmanJR (1997) Muscle activity in wedge, parallel, and giant slalom skiing. Med Sci Sports Exerc; 36(4):548-553.
192. Hintermeister RA, Hagerman GR (2000) Physiology of Alpine Skiing. William E Garrett, Jr Kirkendall et Donald T Kirkendall. Exercise and sport science. Philadelphia : Lippincott Williams & Wilkins; 44:695-707.
193. Hirvonen J, Rehumen S, Rusko M, Härkönen M (1987) Breakdown of high energy phosphate compounds and lactate accumulation during short supramaximal exercise. Eur J Appl Physiol; 56: 253-59.
194. Hofman P, von Duvillard SP, Meyer N, Schwaberger G, Traninger H, Leitner C, Pokan R (2000) EMG, power and elektrolyte changes resulting from a series of consecutive supra-maximal laboratory tests in competitive alpine ski racers. in: Müller et al., Science and skiing; 90-91.
195. Hogan MC, Richardson RS, Kurdak SS (1994) Initial fall in skeletal muscle force development during ischemia is related to oxygen availability. J Appl Physiol; 77(5):2380-4.
196. Hogan MC, Kurdak SS, Arthur PC (1996) Effect of gradual reduction in O_2 delivery on intracellular homeostasis in contracting skeletal muscle. J Appl Physiol; 80 (4):1313-21.
197. Hopkins WG, Hawley JA, Burke LM (1999) Design and analysis of research on sport performance enhancement. Med Sci Sports Exerc; 31:472-85
198. Hopkins WG (2000) Measures of reliability in sports medicine and science. Sports Med; 30:1-15.
199. Hopkins WG, Marshall SW, Batterham A, Hanin J (2009) Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. Med Sci Sports Exerc; 41(1):3-12.

200. Horak FB (1987) Clinical measurement of postural control in adults. Phys Ther; 67:1881-5.
201. Howald H, Von Glutz G, Billeter R (1978) Energy stores and substrate utilization in muscle during exercise. in: Landry F, Orban WAR, editors. The Third International Symposium on Biochemistry of Exercise; Miami (FL): Miami Symposia Specialists; 75-86.
202. Hugel F, Cadopi M, Kohler F (1999) Postural control of ballet dancers: a specific use of visual input for artistic purposes. Int J Sports Med; 20:86-92.
203. Hultman E, Sahlin K (1980) Acid-base balance during exercise. Exerc Sport Sci Rev; 8:41-128.
204. Hydren JR, Volek JS, Maresh CM, Comstock BA, Kraemer WJ (2013) Review of strength and conditioning for alpine ski racing. J Strength Cond Res; 35:10-28.
205. Impellizzeri FM, Rampinini E, Freschi M, Maffiuletti A, Bizzini M, Mognoni P (2009) Identification of the physical characteristics that discriminate between competitive levels and specialities of alpine skiers. in: Müller et al., Science and skiing; 272-280.
206. Inbar O, Dotan R, Bar-Or O (1976) Aerobic and anaerobic components of a thirty-second supra-maximal cycling task Med. Sci. Sports Exerc; 8:51.
207. Ingham SA, Fudge BW, Pringle JS, Jones AM (2013) Improvement of 800-m running performance with prior high-intensity exercise. Int J Sports Physiol Perform; 8(1):77-83.
208. Ingjer F, Stromme SB (1979) Effects of active, passive or no warm-up on the physiologicalresponse to heavy exercise. Eur J Appl Physiol; 40(31):273-82.
209. Jacobs I, Kaiser P, Tesch P (1981) Muscle strength and fatigue after selective glycogen depletion in human skeletal muscle fibers. Eur J Physiol; 46:47-53.
210. Jacobs I, Kaiser P (1982) Lactate in blood, mixed skeletal muscle, and FT or ST fibres during cycle exercise in man. Acta Physiol Scand; 114(11):461-6.
211. Jacobs R, Bobbert MF, van Ingen Schenau GJ (1993) Function of mono- and biarticular muscles in running. Med Sci Sports Exerc 25:1163-73
212. Jalab C (2012) Contribution à l'étude de la sollicitation du métabolisme aérobie au cours d'un 100 m nage libre, Thèse Sciences et techniques des activités physiques et sportives. Poitiers : Université de Poitiers.
213. Jones AM, Wilkerson DP, Burnley M, Koppo K (2003) Prior heavy exercise enhances performance during subsequent perimaximal exercise. Med Sci Sports Exerc; 35:2085-92.
214. Jones AM, Poole DC (2005) Oxygen uptake kinetics in sport, exercise and medicine: Routledge London.
215. Jones AM, DiMenna F, Lothian F, Taylor E, Garland SW, Hayes PR, Thompson KG (2008a) 'Priming' exercise and O2 uptake kinetics during treadmill running. Respir Physiol Neurobiol; 161:182-188.
216. Jones AM, Fulford J, Wilkerson DP (2008b) Influence of prior exercise on muscle [phosphorylcreatine] and deoxygenation kinetics during high-intensity exercise in men. Exp Physiol; 93:468-478.
217. Jones AM, Wilkerson DP, Fulford J (2008c) Muscle [phosphocreatine] dynamics following the onset of exercise in humans: the influence of baseline work-rate. The Journal of physiology; 586: 889-898.
218. Jordan M, Aagaard P, Herzog W (2017) Anterior cruciate ligament injury/reinjury in alpine ski racing : a narrative review. Journal of Sports Medicine; 8:71-83.

219. Joseph T, Johnson B, Battista RA, Wright G, Dodge C, Porcari JP, de Koning JJ, Foster C (2008) Perception of fatigue during simulated competition. Med Sci Sports Exerc; 40:381-6.
220. Kahn JF, Jouanin JC, Espirito-Santo J, Monad H (1993) Cardiovascular responses to leisure alpine skiing in habitually sedentary middle-aged men. J Sports Sci 11:31-36.
221. Karlsson J, Saltin B (1970) Lactate, Atp, and CP in working muscles during exhaustive exercise in man. J Appl Physiol; 29:598-602.
222. Karlsson J (1971) Lactate and phosphagen concentrations in working muscle of man. Acta phyiologica scandinavica; 358:1-72.
223. Karlsson J (1978) The Physiologie of Alpine Skiing. [trad.] William Michael. Park City : US Ski Coaches Association Published (1977) in Swedish by Trygg-Hansa Insurance Co., Stockholm, Sweden; 30-41.
224. Karlsson J, Jacobs I (1982) Onset of blood lactage accumulation during muscular exercise as a threshold concept. I Theoretical considerations. Int J Sports Med; 3:190-201.
225. Karlsson J (1984) Profiles of cross-country and alpine skiers. Clin Sports Med; 3(1)245-71.
226. Karlsson J (2005) Alpine skiing physiology: retro and prospectus. in: Muller et al., Science and skiing; 3:24-38.
227. Katch VL (1973) Kinetics of oxygen uptake and recovery for supra- maximal work of short duration. Int Z Angew Physiol; 31:197-207
228. Kavanagh MH, Jacobs I (1988) Breath-by-breath oxygen consumption during performance of the Wingate test. Can J Appl Sport Sci; 13(1):91-3.
229. Keränen T, Ihalainen S, hynynen E, Salo T (2010) FIS-ranking and carving turn force production profile. 5th International Congress on Science and Skiing. Salzburg.
230. Kibele A., Behm D (2012) Load training on instable surfaces - an important addition to traditional strength training programs for alpine skiers, in Müller et al., Science of skiing; 218-224.
231. Kindermann W, Keul J, Huber G (1977) Physical exercise after induced alkalosis (bicarbonate or tris-buffer). Eur J Appl Physiol; 37:197-204.
232. Kirkeberg JM, Dalleck LC, Kamphoff CS, Pettitt RW (2011) Validity of 3 Protocols for Verifying VO_{2max}. Int J Sports Med; 32:266-270.
233. Kisser R, Gethals B, Wrobel M (1996) Epidmiology for marketing skiing. in: Johnson RJ, Mote CD, eds. Skiing trauma and safety: 10th vol., ASTM STP 1266. Philadelphia: American Society for Testing and Materials; 104-15.
234. Klous M (2007) Three-dimensional joint loading one the lower extremities in alpine skiing and snowboarding. Unpublished dissertation. University of Salzburg, Salzburg, Austria.
235. Knapik JJ, Sharp MA, Canham-Chervak M, Hauret K, Patton JF, Jones BH (2001), Risk factors for training-related injuries among men and women in basic combat training. Med Sci Sports Exerc; 33(6):946-54.
236. Knuttgen HG, Klausen K (1971) Oxygen debt in short-term exercise with concentric and eccentric muscle contractions. J Appl Physiol; 30:632–635.
237. Koistinen P, Takala T, Martikkala V, Leppaluoto J (1995) Aerobic fitness influences the response of maximal oxygen uptake and lactate threshold in acute hypobaric hypoxia. Int J Sport Med; 16:78-81.
238. Komi PV, Rusko H, Vos J, Vuiko V (1977) Anaerobic performance capacity in athletes. Acta Physiol Scand; 100:107-114.
239. Kohrt WM, O'Connor JS, Skinner JS (1989) Longitudinal assessment of

responses by triathletes to swimming, cycling, and running. Med Sci Sports Exerc; 21(5):569-575.
240. Koppo K, Bouckaert J (2002) The decrease in the VO_2 slow component induced by prior exercise does not affect the time to exhaustion. Int J Sports Med; 23:262-7.
241. Koutedakis Y, Boreham C, Kabitsis C, Sharp NCC (1992) Seasonal deterioration of selected physiological variables in elite male skiers. Int J Sports Med; 13:548-551.
242. Koyangi MSK, Yoshimoto Y, Inoue S, Sato M, Nakata K (2006) Effects of changes in skiing posture on the kinetics of the knee joint. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc; 14:88-93.
243. Kröll J, Schieffermüller C, Raschner C, Müller E (2003) Specific training and imitation exercises in competitive alpine skiing.
244. Kröll J, Schiefermüller C, Birklbauer J, Müller E (2005) Inline-skating as a dry land modality for slalom racers – electromyographic and dynamic similarities and differences. In: Müller E. et al. Science and skiing.
245. Kröll J, Wakeling M, Seifert J, Müller E (2009) EMG signal processing by wavelet transformation – applicability to alpine skiing. in: Müller et al., Science and skiing 4:320-326.
246. Kröll J (2010) Muscle activity during recreational alpine skiing – determined by a new methodological approach in alpine skiing surface EMG analysis, Dissertation, Universität Salzburg.
247. Kröll J, Spörri J, Gilgien M, Schwameder H, Müller E (2015a) Effect of ski geometry on aggressive ski behaviour and visual aesthetics : equipment designed to reduce risk of severe traumatic knee injuries in alpine giant slalom ski racing. Br J Sports Med; 0:1-7.
248. Kröll J, Spörri J, Kandler C, Fasel B, Müller E, Schwameder H (2015b) Kinetic and kinematic comparison of alpine ski racing disciplines as a base for specific conditioning regimes. International Conference on Biomechanics in Sports, Poitiers, France, June 29 - July 3, 2015 Floren Colloud, Mathieu Domalain & Tony Monnet (Editors).
249. Krustrup P, Gonzalez-Alonso J, Quistorff B, Bangsbo J (2001) Muscle heat production and anaerobic energy turnover during repeated intense dynamic exercise in humans. The Journal of physiology 536:947-956.
250. Kugovnic O, Supej N, Nemec B (2003) Biomechanics of alpine skiing. Ljubljana : Faculty of sport.
251. Kuno S-Y, Inaki M, Tanaka K, Itai Y, Asano K (1994) Muscle energetics in short- term training during hypoxia in elite combination skiers. Eur J Appl Physiol; 69: 301-304.
252. Kusnezow W (1977) Kraftvorbereitung, Berlin (cited by Raschner, in Müller et al. 1996)
253. Lacour JR, Bouvat E, Barthelemy JC (1990) Post-competition blood lactate concentrations as indicators of anaerobic energy expen- diture during 400-m and 800-m races. Eur J Appl Physiol; 61:172-176.
254. Lador F, Tam E, Adami A, Kenfack MA, Bringard A, Cautero M, Moia C, Morel DR, Capelli C, Ferretti G (2013) Cardiac output, O2 delivery and VO2 kinetics during step exercise in acute normobaric hypoxia. Respiratory Physiology & Neurobiology; 186:206-213.
255. Lamarra NB, Whipp BJ, Ward SA, Wasserman K (1987) Effect of interbreath fluctuations on characterizing exercise gas exchange kinetics. J Appl Physiol; 62:2003-12.

256. Lamb S, Greenlick MR, McCarty D (1998) Bridging the gap between research and practice: forging partnerships with community- based drug and alcohol treatment. Washington, DC: National Academy Press.
257. Lamontagne M (2001) Plantar pressure distribution and forces measured during slalom and giant slalom turns performed by elite skiers. 19th International Symposium on Biomechanics in Sports. San Francisco; 211-214.
258. Laurent D, Reutenauer H, Payen JF, Favre-Juvin , Eterradossi J, Lebas JF, Rossi A (1992) Muscle bioenergetics in skiers : studies using NMR spectroscopy. Int J Sports Med; 13(1):150-2.
259. Lawler J, Powers SK, Thompson D (1988) Linear relationship between VO_{2max} and VO_{2max} decrement during exposure to acute hypoxia. J Appl Physiol; 64:1486-92.
260. Le Meur Y (2010) Les stratégies d'allure dans la performance sportive de haut niveau : analyse des variabilités et exposé des phénomènes explicatifs, Doctorat, Université de Nice – Sophia Antipolis.
261. Lewis SF, Taylor WF, Graham RM, Pettinger WA, Schutte JE, Blomqvist CG (1983) Cardiovascular response to exercise as functions of absolute and relative workload. J Appl Physiol; 54:1314-23.
262. Lindinger MI, McKelvie RS, Heigenhauser GJ (1995) K+ and Lac - distribution in humans during and after high-intensity exercise: role in muscle fatigue attenuation? Journal of Applied Physiology; 78(3):765-777.
263. Lourenco TF, Martins LEB, Tessutti LS, Brenzikofer R, Macedo DV (2011) Reproducibility of an incremental treadmill VO_{2max} test with gas exchange analysis for runners. J Strength Cond Res; 25:1994-99.
264. Lovering AT, Romer LM, Haverkamp HC, Pegelow DF, Hokanson JS, Eldridge MW (2008) Intrapulmonary shunting and pulmonary gas exchange during normoxic and hypoxic exercise in healthy humans. J Appl Physiol; 104 :1418–1425.
265. Lucia A, Joyos H, Chicharro JL (2000) Physiological response to professional road cycling: climbers vs. time trialists. Int J Sports Med; 21:505-512.
266. Macfarlane DJ, Wong P (2012), Validity, reliability and stability of the portable Cortex Metamax 3B gas analysis system. Eur J Appl Physiol; 7:2539-47.
267. Maffiuletti NA, Impellizzeri F, Rampinini E, Bizzini M, Mognoni P (2006) Letter to the Editors - Is Aerobic Power Really Critical for Success in Alpine Skiing? Int J Sports Med; 27:166–167.
268. Maffiuletti NA, Jordan K, Spring H, Impellizzeri FM, Bizzini M (2009) Physiological profile of Swiss elite alpine skiers – a 10-year longitudinal comparison. in Müller et al., Science and skiing; 365-373.
269. Malliou P, Amoutzas K, Theodosiou A, (2004) Proprioceptive training for learning downhill skiing. Percept Mot Skills; 99:149-54.
270. Marck A, Antero J, Berthelot G, Saulière G, Jancovici J-M, Masson-Delmotte V, Boeuf G, Spedding M, Le Bourg É, Toussaint J-F (2017) Are We Reaching the Limits of Homo sapiens? Front. Physiol; 8:812.
271. Marcora SM. (2008) Do we really need a central governor to explain brain regulation of exercise performance? Eur J Appl Physiol; 104(5):929-31.
272. Margaria R, Edwards HT, Dill DB (1933) The possible mechanisms of contracting and paying the oxygen debt and the role of lactic acid in muscular contraction. Am J Physiol; 106:689-715.
273. Margaria R, Cerretelli P, di Prampero E, Massari C, Torelli G (1963) Kinetics and mechanism of oxygen debt contraction in man. J Appl Physiol; 18:371-77.
274. Martin D, O'Kroy J (1993) Effects of acute hypoxia on the VO_{2max} of trained and untrained subjects. J Sports Sci; 11(1):37-42.

275. Massey BH, Johnson WR, Kramer GF (1961) Effect of warm-up exercise upon muscular performance using hypnosis to control the psychological variable. Res Q Exerc Sport; 32:63-71.
276. Matthews DK, Snyder HA (1959) Effect of warm-up on the 440-yard dash. Res Q Exerc Sport; 30:446-51.
277. Matthews DK, Fox EL (1971) The physiological basis of physical education and athletics. Philadelphia (PA).
278. Mauger AR, Jones AM, Williams CA (2009) Influence of feedback and prior experience on pacing during a 4-km cycle time trial. Med Sci Sports Exerc; 41:451-458.
279. Maxwell SM, Hull HL (1989) Measurement of strength and loading variables in the knee during Alpine skiing. Journal of Biomechiancs; 22 (6):609-624.
280. McCutcheon LJ, Geor RJ, Hinchcliff KW (1999) Effects of prior exercise on muscle metabolism during sprint exercise in humans. J Appl Physiol; 87(5):1914-22.
281. McGinnis PM, Piper FC, Dillman CJ (1981) Skills tests for discrimination of alpine skiing ability. Journal of the United States Ski Coaches Association; 4:20-5.
282. McGraw KO, Wong SP (1996) Forming inferences about some intraclass correlation coefficients. Psychol Methods; 1:30-46.
283. McLaughlin JE, King GA, Howley ET, Bassett DR (2001) Ainsworth BE. Validation of the COSMED K4 b2 portable metabolic system. Int J Sports Med; 22: 280-284.
284. Medbo J, Sejersted O (1985) Acid–base and electrolyte balance after exhausting exercise in endurance-trained and sprint-trained subjects. Acta Physiol Scand; 125:7-109.
285. Medbo JI, Mohn AC, Tabata I, Bahr R, Vaage O, Sejersted OM (1988) Anaerobic capacity determined by accumulated O2 deficit. J Appl Physiol; 64:50-60.
286. Medbo JI, Tabata I (1989) Relative importance of aerobic and anaerobic energy release during short-lasting exhausting bicycle exercise. J Appl Physiol; 67:1881-86.
287. Meir R (1993) Evaluating player's fitness in professional rugby league: reducing subjectivity. Strength Cond Coach; 1:11-17.
288. Medbo JI (1996) Medbø responds to Bangsbo's paper. Can J Appl Physiol 21: 364-369.
289. Mester J, Spietzenplei P, Schwarzer J, Seifrietz F (1999) Biological reaction to vibration – implication for sport. J of Sport and Medicine in Sport; 2(3):211-226.
290. Meyer NL, Johnson SC, Askew EW, Von Duvillard SP, Hofmann P, Kipp RW, Manore MM (2000) Nutritional issues in alpine ski racing during the preparatory phase. in Müller et al., Science and skiing; 114-115.
291. Meyer F (2012) Thesis, University of Lausanne (Switzerland) Biomechanical analysis of alpine skiers performing giant slalom turns.
292. Micklewright D, Parry D, Robinson T, Deacon G, Renfree A, St Clair Gibson A, Matthews WJ (2015) Risk perception influences athletic pacing strategy, Medicine & Science in Sports & Exercise; 47(5):1026-37.
293. Millet GP, Vleck VE, Bentley DJ (2009) Physiological Differences Between Cycling and Running, Lessons from Triathletes. Sports Med; 39(3):179-206.
294. Ministère des sports, de la jeunesse, de l'éduction populaire et de la vie associative (2013) Jeunesse, Sports & Vie associative, Bulletin Officiel n°5.
295. Miura T, Miura M (2012) Relationship of physiological characteristics to competitive performance for junior high school and high school male alpine ski racers., in Müller et al., Science and skiing; 298-307.
296. Mollard P, Woorons X, Letournel M, Cornolo J, Lamberto C, Beaudry M, Richalet JP, (2007a) Role of maximal heart rate and arterial O_2 saturation on the

decrement of VO_{2max} in moderate acute hypoxia in trained and untrained men. Int J Sports Med; 28:186-192.
297. Mollard P, Woorons X, Letournel M, Lamberto C, Favret F, Pichon A, Beaudry M, Richalet JP (2007b) Determinants of maximal oxygen uptake in moderate acute hypoxia in endurance athletes. Eur J Appl Physiol; 100:663-673.
298. Mollard P, Woorons X, Antoine-Jonville S, Jutand L, Richalet JP, Favret F, Pichon A (2008) 'Oxygen uptake efficiency slope' in trained and untrained subjects exposed to hypoxia, Respir Physiol Neurobiol; 161(2):167-73.
299. Morin E (1982), Science avec conscience. Fayard, Nouvelle édition remaniée, coll. Points, 1990.
300. Morin E (1988), Le défi de la complexité. Chimères.
301. Morin E (2005) La complexité, un défi à la connaissance.
302. Morrissey MC, Harman EA, Johnson MJ (1995) Resistance training modes : specificity and effectiveness. Me Sci Sports Exerc; 27(5):648-60.
303. Moseley L, Jeukendrup AE (2001) The reliability of cycling efficiency. Med Sci Sports Exerc; 33:621-7.
304. Mueller E, Schiefermuller C, Kroel J, Raschner C, Schwameder H (2004) Skiing with carving skis – What is new ? in Bacharach et al., 3rd International congress on skiing and science, Aspen, St Cloud State University; 1-2.
305. Muir PA (1996) Expertise in surfing: Nature of the perceptual advantage. Unpublished honours thesis, University of Ballarat, Ballarat, VIC.
306. Müller E (1994) Analysis of the biomechanical characteristics of different swinging techniques in alpine skiing. Journal of Sport Sciences; 12:261-278.
307. Müller E, Benko U, Raschner C, Schwameder H (2000) Specific fitness training and testing in competitive sports. Medicine and Science in Sports and Exercise; 32(1): 216-220.
308. Müller E, Schwameder H (2003) Biomechanical aspects of new techniques in alpine skiing and ski-jumping. J Sports Sci; 21:679-692.
309. Müller L, Müller E, Raschner C (2016) The relative age effect in alpine skiing: a review. Talent Dev Excell; 8:3-14.
310. Müller L, Gonaus C, Perner C, Müller E, Raschner C (2017) Maturity status influences the relative age effect in national top level youth alpine ski racing and soccer. PLoS ONE; 12(7): e0181810.
311. Nachbauer W (1987) Skiing line and ground reaction forces of ski racers over various distances between gates. In E Kornexl (Ed.), Spektrum der Sportwissenschaften. Wien: ÖBV.
312. Nachbauer W, Rauch A (1991) Biomechanische Analysen der Torlaufund Riesentorlauftechnik. in : F Fetz et E Müller. Biomechanik des alpinen Skilaufs. Stuttgart : Enke Verlag, (Cited by Hintermeister & al. 2000); 50-100.
313. Nakazato K, Scheiber P, Müller E (2011) A comparison of ground reaction forces determined by potable force-plate and pressure-insole systems in alpine skiing. J of Sports Sc And Med; 10:754-762.
314. Neumayr G, Hoertnagl H, Pfister R, Koller A, Eibl G, Raas E (2003) Physical and physiological factors associated with success in professional alpine skiing. Int J Sports Med; 24(8):571-5.
315. Neumayr G, Hoertnagl H, Raas (2006) The authors' reply – letter to the editors. Int J Sports Med; 27:168-169.
316. Nevill ME, Bogdanis GC, Boobis LH (1996) Muscle metabolism and performance during sprinting. Champaign (IL): Human Kinetics; 243-59.
317. New Studies in Athletics Round Table (1996) Speed in the 800metres. New Stud

Athlet; 11(4):7-22.
318. Nicholls JG (1989) The competitive ethos and democratic education.
319. Nigg BN, Liu W (1999) The effect of muscle stiffness and damping on simulated impact force peaks during running. J Biomech; 32:849-56.
320. Nilsson R, Lindberg AS, Theos A, Ferguson RA, Malm C (2018) Aerobic Variables for Prediction of Alpine Skiing Performance - A Novel Approach. Sports Med Int Open; 2(4):105-112.
321. Noakes TD, St Clair Gibson A, Lambert EV (2004) From catastrophe to complexity: a novel model of integrative central neural regulation of effort and fatigue during exercise in humans. Br J Sports Med; 38:511-514.
322. Noble BJ, Metz KF, Pandolf KB, Cafarelli E (1973) Perceptual responses to exercise: a multiple regression study. Med Sci Sports; 5:104-109.
323. Noe F, Paillard T (2005) Is postural control affected by expertise in alpine skiing? Br J Sports Med; 39:835-7.
324. Nummela A, Vuorimaa T, Rusko H (1992) Changes in force production, blood lactate and EMG activity in the 400-m sprint. J Sports Sci; 10:217-228.
325. Nummela A, Rusk HK (1995) Time course of anaerobic and aerobic energy expenditure during short-term exhaustive run in athletes. Int J Sport Med; 16:522-527.
326. Nygaard E, Andersen P, Nilsson P, Eriksson E, Kjessel T, Saltin B (1978) Glycogen depletion pattern and lactate accumulation in leg muscles during recreational downhill skiing. Eur J Appl Physiol Occup Physiol; 38:26-269.
327. O'Brien B, Payne W, Gastin P (1997) A comparison of active and passive warm ups on energy system contribution and performance in moderate heat. Aust J Sci Med Sport; 29(4):106-9.
328. Osgnach, C, di Prampero, P (2018) Metabolic power in team sports – Part 2: aerobic and anaerobic energy yields. Int J Sports Med; 39: 588-595.
329. Paillard T, Noe F (2006) Effect of expertise and visual contribution on postural control in soccer. Scand J Med Sci Sports; 16(5):345-8.
330. Pandolf KB (1982) Differentiated ratings of perceived exertion during physical exercise. Med Sci Sports Exerc; 14:397-405.
331. Panizzola FA, Petrone N, Marcolin G (2010) Comaprative analysis of muscle activation patterns between skiing on slopes and on training devices. Procedia Engineering; 2:2537-42.
332. Parry D, Chinnasamy C, Micklewright D (2012) Optic Flow Influences Perceived Exertion During Cycling. Journal of Sport & Exercise Psychology; 34:444-456.
333. Patterson C, Raschner C, Platzer HP (2014) The 2.5 minute loaded repeated jump test : evaluating anaerobic capacity in alpine ski racers with loaded countermovement jumps. Journal of Strength and Conditioning Research; 28(9):2611-20.
334. Patterson C, Platzer H-P, Raschner C (2019) The 2 Minute Loaded Repeated Jump Test: Longitudinal Anaerobic Testing in Elite Alpine Ski Racers. Journal of Sports Science and Medicine; 18:128-136.
335. Pederson (1991) Influence of physical activity on the cellular immune system : mechanisms of action. Int J Sports Med; 12(1):23-29.
336. Peltonen JE, Tikkanen HO, Rusko HK (2001) Cardiorespiratory responses to exercise in acute hypoxia, hyperoxia and normoxia. Eur J Appl Physiol; 85:82-88.
337. Perrey H (2003) Prolonged kinetics of oxygen uptake during recovery from eccentric versus concentric cycle exercise. Science et motricité; 48(1):83-97.
338. Péronnet F, Thibault G (1989) Mathematical analysis of running performance

and world running records. J Appl Physiol; 67(1):453-65.
339. Philips SM, Green HJ, MacDonald MJ, Hughson RL (1995) Progressive effect of endurance training on VO_2 kinetics at the onset of submaximal exercise. J Appl Physiol; 79(6):1914-20.
340. Piper FC, Ward CHT, McGinnis PM, Milner K (1987) Prediction of alpine ski performance based upon selected anthropometrical and motor dexterity parameters. Journal of Sports Medicine; 27:478-82.
341. Piucco T, dos Santos SG, de Lucas RD, Dias JA (2015) A novel incremental slide board test for speed skaters: Reliability analysis and comparison with a cycling test. Apunts Med Esport; 50(186):57-63.
342. Piucco T, O'Connell J, Stefanyshyn D, de Lucas RD (2016) Incremental testing design on slide board for speed skaters: comparison between two different protocols. J Strength Cond Res; 30(11):3116-21.
343. Piucco T, Diefenthaeler F, Soares R, Murias JM, Millet GY (2017) Validation of a maximal incremental skating test performed on a slide board: comparison with treadmill skating. Int J Sports Physiol and perform; 24:1-15.
344. Platzer HP, Raschner C, Patterson C (2006) Concentric/eccentric strength endurance differences in female alpine ski racers. Isokinetic Exercise Science Journal; 14:196-197.
345. Pociello C (1995) Les cultures sportives. PUF.
346. Polat M. (2016) An examination of respiratory and metabolic demands of alpine skiing. Journal of Exercise Science & Fitness; 14:76-81.
347. Pollock ML, Gettman LR, Jackson A, Ayres J, Ward A, Linnerud AC (1977) Body composition of elite class distance runners. Ann N Y Acad Sci; 301: 361-370.
348. Poole DC, Richardson RS (1997) Determinants of oxygen uptake. Implications for exercise testing. Sports Med; 24:308-320.
349. Poortmans J, Boisseau N (2017) Biochimie des activités physiques et sportives. 2nd édition, De Boeck.
350. Pozzo R, Canclini A, Cotelli C, Baroni G (2005) 3-D kinematics and kinetic analysis of G-slalom in elite skiers at Val Badia world cup race in 2002. in Müller et al., Science and skiing; 125-135.
351. Pozzo R., Zancolo F., Canclini A., Baroni G (2009) Loading conditions and neuromuscular activity during vertical knee flexion-extension and turn like movement in the new simulator under vibration conditions, in Müller et al. Sciences and Skiing; 410-418.
352. Pozzo R, Canclini A, Baroni G, Benedetti D, D'Ottavio S (2012) 3-D kinematic and kinetics analysis of slalom in elite skiers at the Bormio World Cup ski finals in 2008. in Müller et al. Sciences and skiing; 355-363.
353. Proteau L (1992) On the specificity of learning and the role of visual information for movement control. In L. Proteau, & D. Elliott (Eds.), Vision and motor control. Amsterdam: North-Holland.
354. Pryor SL, Lewis SF, Haller RG, Bertocci LA, Victor RG (1990) Impairment of sympathetic activation during static exercise in patients with muscle phosphorylase deficiency (McArdle's disease). J Clin Invest; 85:1444-49.
355. Piucco T, dos Santos SG, de Lucas RD, Dias JA (2015) A novel incremental slide board test for speed skaters: Reliability analysis and comparison with a cycling test. Apunts Med Esport; 50(186):57-63.
356. Pujol N, Rousseaux-Blanchi MP, Chambat P (2007) The Incidence of Anterior Cruciate Ligament Injuries Among Competitive Alpine Skiers. The American J of Sports Med; 35(7):1070-74.

357. Raschner C, Müller E, Schwameder H (1996) Kinematic and kinetic analysis of slalom turns as a basis for te development of specific training methods to improve strength and endurance. in Müller et al. Sciences and skiing; 251-261.
358. Raschner C, Platzer H, Patterson C, Werner I, Huber R, Hildebrandt C (2012) The reltionship between ACL injuries and physical fitness in young competitive ski racers. Br J of Sports Med; 46(15):1065-71.
359. Raschner C, Patterson C, Barth M, Barth A (2012b) Development of a multi-axial mechatronic training and testing device for alpine ski racers. in Müller et al. Sciences and skiing; 364-372.
360. Raschner C, Mutschlechner L (2016) Impact of simulated ski-specific shocks on force, time, and knee angle parameters: a pilot study. In Müller et al. Science and skiing VII; 165-173.
361. Ratel S, Duché P, Hennegrave A, van Praagh E, Bedu M (2002), Acid-base balance during repeated cycling sprints in boys and men. J Appl Physiol; 92:479-85.
362. Règlement des concours internationaux du ski (2013) Livre IV Règles communes. Adoptés par le 48ème congrès international de ski, Kangwonland, Corée du Sud.
363. Reid RC, Johnson SC, Kipp RW, Albert RW, White AT (1996) Validity of sport-specific field tests for elite and developing alpine ski racers. in Müller et al. Science and skiing; 285-296.
364. Reid R (2010) A kinematic and kinetic study of alpine skiing technique in slalom, Dissertation, Norwegian School of sport sciences (Norway).
365. Renfree A, Martin L, Micklewright D, St Clair Gibson A (2014) Application of decision- making theory to the regulation of muscular work rate during self-paced competitive endurance activity. Sport Med; 44(2):147-158.
366. Reybrouck T, Heigenhauser GF, Faulkner JA (1975) Limitations to maximum oxygen uptake in arms, leg, and combined arm-leg ergometry. J Appl Physiol; 38(5):774-9.
367. Ribeiro J, Figueiredo P, Sousa A, Monteiro J, Pelarigo J, Vilas Boas JP, Toussaint HM, Fernandes RF (2015) VO_2 kinetics and metabolic contributions during full and upper body extreme swimming intensity. Eur J Appl Physiol; 115(5):1117-24.
368. Richardson RS, White AT, Seifert JD, Porretta JM, Johnson SC (1993) Blood lactate concentrations in elite skiers during a series of on-snow downhill ski runs. Journal of Strength & Conditioning Research ; 7(3):168-171.
369. Rieu M, Duvallet A, Scharapan L (1988) Blood lactate accumulation in intermittent supramaximal exercise. Eur J Appl Physiol; 57:235-42.
370. Robergs RA, Costill DL, Fink WJ, Williams C, Pascoe DD, Chwalbinska-Moneta J, Davis JA (1990) Effects of Warm-Up on Blood Gases, Lactate and Acid-Base Status During Sprint Swimming. Int J Sports Med; 11(4):273-278.
371. Robinson S, Edwards HT, Dill DB (1937) New Records in Human Power. Science; 85:409-410.
372. Rodriguez F, Marde A (2003) Energy metabolism during 400 and 100-m crawl swimming: cimputer simulation based on free swimming measurement. Biomechanics and medicine in swimming; 8:373-378.
373. Rognmo K, Helgerud J, Hoff J (2002) Aerobic Demands in Giant Slalom Skiing. Department of Sports Sciences, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim (Norway).
374. Rundell CF (1996) Compromised oxygen uptake in speed skaters during treadmill in-line skating. Med Sci Sports Exerc 28:120–127.
375. Rusko H, Havu M, Karvinen E (1978) Aerobic performance capacity in athletes.

Eur J Appl Physiol Occup Physiol; 38(2):151-9.
376. Sadamoto T, Bonde-Petersen F, Suzuki Y (1983) Skeletal muscle tension, flow, pressure, and EMG during sustained isometric contractions in humans. Eur J Appl Physiol Occup Physiol; 51:395-408.
377. Saibene F, Cortili G, Gavazzi P, Magistri P (1985) Energy sources in alpine skiing (giant slalom). Eur J Appl Physiol Occup Physiol; 1(53):312–6.
378. Saltin B, Astrand PO (1967) Maximal oxygen uptake in athletes. J Appl Physiol ; 23: 353-358.
379. Saltin B (1990) Anaerobic capacity: past, present, and future. in: Taylor AW., editor. Biochemistry of exercise VII: international series on sport sciences. Champaign (IL): Human Kinetics; 387-412.
380. Saltin B, Radegran G, Koskolou MD, Roach RC (1998) Skeletal muscle blood flow in humans and its regulation during exercise. Acta Physiol; 162(3):421-36.
381. Sands WA, McNeal JR, Ochi MT, Urbanek TL, Jemni M, Stone MH (2004) Comparison of the Wingate and Bosco anaerobic tests. J Strength Cond Res; 18:810-15.
382. Schaff P, Hauser W (1989) Ski boot versus knee joint – a sports medicine, orthopaedic and biomechanical problem. Sportverletz Sportschaden; 3:149-61.
383. Scherr J, Wolfarth B, Christle JW, Pressler A, Wagenpfeil S, Halle M (2013) Associations between Borg's rating of perceived exertion and physiological measures of exercise intensity. Eur J Appl Physiol; 113(1):147-155.
384. Schmidt RA (1975) A schema theory of discrete motor skill learning. Psychological review; 82(4):222-260.
385. Schmitt KU, Hörterer, Vogt M, Frey WO, Lorenzetti S (2016) Investigating physical fitness and race performance as determinants for the ACL injury risk in alpine ski racing. BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation; 8:23
386. Seifert JG, Leutkemeier MJ, White A, Mino LM, Miller D (2001) Fluid balance during slalom training in elite collegiate alpine racers. in Müller et al. Science and skiing; 633-640.
387. Seifert JG, Kipp RW, Amann M, Gazal O (2005) Muscle stress, hydration and energy supplementation during recreational alpine skiing. International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism; 15(5):528-36.
388. Serresse O, Lortie G, Bouchard C, Boulay MR (1988) Estimation of the contribution of the various energy systems during maximal work of short duration. Int J Sports Med; 9(6):456-60.
389. Sharp RL, Costill DL, Fink WJ, King DS (1986) Effects of eight weeks of bibycle ergometer sprint training on human muscle buffer capacity. Int J Sports Med; 7:13-17.
390. Shea JB (1983) The alpine skiing assessment battery: The secret to picking the right people and training for the right things. Journal of the United States Ski Coaches Association; 6(3):26-8.
391. Shealy JE, Ettlinger CF, Johnson FJ (1999) Signal detection theory : a model for evaluating release/retention criteria in alpine ski-binding-boot systems. Skiing trauma and safety, 12th Volume, American society for testing and materials; 120-131.
392. Sheppard JM, Young WB (2006) Agility literature review: classifications, training and testing. J Sports Sci; 24(9):919-932.
393. Simoneau M, Begin F, Teasdale N (2006) The effects of moderate fatigue on dynamic balance control and attentional demands. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation; 3(1):22.
394. Sjøgaard G, Savard G., Juel C (1988) Muscle blood flow during isometric

activity and its relation to muscle fatigue. Eur J Appl Physiol Occup Physiol; 57:327-335.
395. Sjolander PA (1989) Sensory Role for the Cruciate Ligaments [dissertation]. Umea University, Umea, Sweden.
396. Skinner JS, Hutsler R, Bergsteinova V, Buskirk ER (1973) Perception of effort during different types of exercise and under different environmental conditions. Med Sci Sports; 5:110-115.
397. Smith JC, Hill DW (1991) Contribution of energy systems during a Wingate power test. Br J Sp Med; 25(4).
398. Smith J, Pepping GJ (2010) Effects of affordance perception on the initiation and actualization of action. Ecological Psychology; 22(2):119-49.
399. Smith G, Rakai L, Reid R (2012) Single-subject analysis methods for alpine skiing technique evaluation. in Müller et al., Science and skiing; 407-417.
400. Smits BL, Pepping G-J, Hettinga FJ (2014) Pacing and decision making in sport and exercise: the roles of perception and action in the regulation of exercise intensity. Sport Med; 44(6):763-775.
401. Solomonow M, Baratta R, Zhou BH (1987) The synergistic action of the anterior cruciate ligament and thigh muscles in maintaining joint stability. Am J Sports Med; 15:207-213.
402. Song TMK (1982) Relationship of physiological characteristics to skiing performance. Physic Sportsmed; 10(12):96-102.
403. Sousa A, Ribeiro J, Sousa M, Vilas-Boas JP, Fernandes RJ (2014) Influence of Prior Exercise on VO_2 Kinetics Subsequent Exhaustive Rowing Performance. PLoS ONE; 9(1).
404. Spencer MR, Gastin PB, Payne WR (1996) Energy system contribution during 400 to 1500 metres running. New Stud Athlet; 11(4):59-65.
405. Spencer MR, Gastin PB (2001) Energy system contribution during 200- to 1500-m running in highly trained athletes. Med Sci Sports Exerc; 33(1):157-62.
406. Spencer M, Fitzsimons M, Dawson B, Bishop D, Goodman C (2006) Reliability of a repeated-sprint test for field-hockey. J Sci Med Sport; 9:181-4.
407. Sperlich B, Born DP, Swaren M, kilien Y, Geesmann B, Kohl-Bareis M, Holmberg HC (2013) Is leg compression beneficial for alpine skiers ? Sports Science Medicine and Rehabilitation; 5:18.
408. Spriet L, Lindinger MI, McKelvie S, Heigenhauser F, Jones NL (1989) Muscle glycogenolysis and H+ concentration during maximal intermittent cycling. J Appl Physiol; 66(1):8-13.
409. Spirk S, Steiner G, Tschakert G, Groeschl W, Schippinger G, Hofman P (2012) Oxygen uptake during race-like alpine giant slalom skiing in relation to variables of the human power spectrum. in Müller et al. Science and skiing; 419-425.
410. Spiro SG (1977) Exercise testing in clinical medicine. Br J Dis Chest; 71(3):145-72.
411. Spitzenpfeil P, Schwarzer J, Seifriz F, Mester J (2000) Vibration : interactions of strength and motor control in alpine skiing. in Müller et al., Science of skiing; 78-79.
412. Spitzenpfeil P, Niessen M, Rienaecker N, Hartmann U (2005) Evaluation of a specific training device in alpine skiing. in Müller et al. Science of skiing; 204-215.
413. Sporer BC, Cote A, Sleivert G (2012) Warm-Up Practices in Elite Snowboard Athletes. International Journal of Sports Physiology and Performance; 7:295-297.
414. Spörri J, Kröll J, Schwameder H, Schiefermüller C, Müller E (2012a) Course setting and selected biomechanical variables related to injury risk in alpine ski racing: an explorative case study. British Journal of Sports Medicine; 46(15):1072-7.

415. Spörri J, Kröll J, Schwameder H, Müller E (2012b) Turn characteristics of a top world class athlete in giant slalom – a case study assessing current performance prediction concepts. International Journal of Sports Science & Coaching; 7(4):647-659.
416. Spörri J, Kröll J, Fasel B, Aminian K, Müller E (2016a) Course setting as a prevention measure for overuse injuries of the back in alpine ski racing. The Orthopaedic Journal of Sports Medicine; 4(2):1-8.
417. Spörri J, Kröll J, Fasel B, Aminian K, Müller E (2016b) Indoor carpet skiing in the rehabilitation of competitive alpine skiers following ACL reconstruction: is it an option ? In Müller et al. Science and skiing VII; 197-206.
418. Spörri J, Kröll J, Fasel B, Aminian K, Müller E (2017) The Use of Body Worn Sensors for Detecting the Vibrations Acting on the Lower Back in Alpine Ski Racing. Front. Physiol. 8:522.
419. Spriet L, Lindinger MI, McKelvie S, Heigenhauser F, Jones NL (1989) Muscle glycogenolysis and H+ concentration during maximal intermittent cycling. J Appl Physiol; 66(1):8-13.
420. Squires RW, Buskirk ER (1982) Aerobic capacity during acute exposure to simulated altitude, 914 to 2286 meters. Med Sci Sport Exerc; 14:36-40.
421. St Clair Gibson A, Lambert EV, Rauch LH, Tucker R, Baden DA, Foster C, Noakes TD (2006) The role of information processing between the brain and peripheral physiological systems in pacing and perception of effort. Sports Med; 36:705-722.
422. St Clair Gibson A, Foster C (2007) The role of self-talk in the awareness of physiological state and physical performance. Sports Med; 37:1029-44.
423. Stainsby WN, Brechue WF, Drobinak DM, Barclay JK (1990) Effects of ischemic and hypoxic hypoxia on voz and lactic acid output during tetanic contractions. J Appl Physiol; 68(2):574-579.
424. Stamford BA, Noble BJ (1974) Metabolic cost and perception of effort during bicycle ergometer work performance. Med Sci Sports; 6:226-231.
425. Stanley WC, Gertz EW, Wisneski JA, Neese RA, Morris DL, Brooks GA (1986) Lactate extraction during net lactate release in legs of humans during exercise. Journal of Applied Physiology; 60(4):1116-20.
426. Stauber WT (1989) Eccentric action of muscles: Physiology, injury, and adaptation. Exerc Sport Sci Rev; 17:157-785.
427. Steadman RJ, Swanson KR, Atkins JW, Hangerman GR (1987) Training for alpine skiing. Clin Orthop; 216:34-38.
428. Stefanyshy DJ, Nigg B.M (1997) Contribution of the lower extremity joints to mechanical energy in running vertical jumps and running long jumps. Journal of Sports Science; 16:177-186.
429. Stewart IB, Sleivert GG (1998) The effect of warm-up intensity on range of motion and anaerobic performance. J Orthop Sports Phys Ther; 27(2):154-61.
430. Stöcker F, Goll M, Fus V, Spitzenpfeil P (2016) Microvascular oxygen extraction during competitive alpine skiing with regard to loaded and unloaded phases. In Müller et al. Science and skiing VII; 207-215.
431. Stöggl T, Schwarzl C, Müller E, Nagasaki M, Stöggl J, Scheiber P, Schönfelder M, Niebauer J (2016) A Comparison between Alpine Skiing, Cross-Country Skiing and Indoor Cycling on Cardiorespiratory and Metabolic Response. Journal of Sports Science and Medicine; 15:184-195.
432. Suga T, Okita K, Morita N, Yokota T, Hirabayashi K, Horiuchi M, Takada S, Takahashi T, Omokawa M, Kinugawa S, Tsutsui H (2009), Intramuscular metabolism during low-intensity resistance exercise with blood flow restriction. J Appl Physiol; 106:1119-24.

433. Supej M, Kugovnik P, Nemec B (2002) New advances in racing slalom technique. Kinesiol Slov; 8(1):25-29.
434. Supej M, Kipp R, Holmberg HC (2011) Mechanical parameters as predictors of performance in alpine World Cup slalom racing. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports; 21(6), e72-81.
435. Supej M, Ogrin J, Holmberg H-C (2018) Whole-Body Vibrations Associated With Alpine Skiing: A Risk Factor for Low Back Pain? Front. Physiol. 9:204.
436. Supej M, Ogrin J (2019) Transmissibility of whole-body vibrations and injury risk in alpine skiing. J Sci Med Sport Mar 12. pii: S1440-2440(19)30213-0.
437. Swart J, Lamberts RP, Lambert MI, Lambert EV, Woolrich RW, Johnston S, Noakes TD (2009) Exercising with reserve: exercise regulation by perceived exertion in relation to duration of exercise and knowledge of endpoint. Br J Sports Med; 43:775-781.
438. Szmedra L, Joohee IM, Nioka S, Chance B, Rundell KW (2001) Hemoglobin/ myoglobin oxygen desaturation during Alpine skiing. Medicine Science in Sports Exercise; 33(2):232-6.
439. Takai K (1998) Cognitive strategies and recall of pace by long-distance runners. Percept Mot Skills; 86:763-770
440. Tang SH, Hall VC (1995) The overjustification effect: a meta-analysis. Applied Cognitive Psychology; 9:365-404.
441. Tarka MC, Davey A, Lonza GC, O'Brien CM, Delaney JP, Endres NK (2019) Alpine Ski Racing Injuries. Sports Health ; Jan 28:1941738119825842. doi:10.1177/1941738119825842. [Epub ahead of print]
442. Taylor HL, Buskirk E, Henschel A (1955) Maximal oxygen intake as an objective measure of cario-respiratory performance. J appl Physiol; 8(1):73-80.
443. Taylor AD, Bronks R, Smith P, Humphries B (1997) Myoelectric evidence of peripheral muscle fatigue during exercise in severe hypoxia: some references to m. vastus lateralis myosin heavy chain composition. Eur J Appl Physiol Occup Physiol; 75:151-159.
444. Tenenbaum G, Levy Kolker N, Sade S, Lieberman D, Lidor R (1996) Anticipation and confidence of decisions related to skilled performance. International Journal of Sport Psychology; 27:293-307.
445. Terrados N, Mizuno M, Andersen H (1985) Reduction in maximal oxygen uptake at low altitudes; role of training status and lung function. Clin Physiol; 5(3):75-79.
446. Tesch PA, Larsson L, Eriksson A, Karlsson J (1978) Muscle glycogen depletion and lactate concentration during downhill skiing. Med Sci Sports; 10: 85-90.
447. Tesch PA, Daniels WL, Sharp DS (1982) Lactate accumulation in muscle and blood during submaximal exercise. Acta Physiol Scand; 114(12):441-6.
448. Tesch PA, Dudley GA, Duvoisin MR, Hather BM, Harris RT (1990) Force EMG signal patterns during repeated bouts of concentric or eccentric muscle actions. Acta Physiol Scand; 138:263-271.
449. Tesch PA (1995) Aspects on muscle properties and use in competitive alpine skiing. Med Sci Sports Exerc; 27:310-314.
450. Thomas C, Hanon C, Perrey S, Le Chevalier J-M, Couturier A, Vandewalle H (2005) Oxygen uptake response to an 800-m running race. Int J Sports Med; 26(4):268-273.
451. Thompson KG, MacLaren DP, Lees A, Atkinson G (2004) The effects of changing pace on metabolism and stroke characteristics during high-speed breaststroke swimming. J Sports Sci; 22:149-157.

452. Tipton MJ, Harper A, Paton JFR, Costello JT (2017) The human ventilatory response to stress: rate or depth ? J Physiol; 595(17) :5729-5752.
453. Tofler IR, Knapp PK, Lardon MT (2005) Achievement by Proxy Distortion in Sports: A Distorted Mentoring of High-Achieving Youth. Historical Perspectives and Clinical Intervention with Children, Adolescents, and their Families. Clinics in Sports Medicine; 24(4):805-28.
454. Tomaras EK, MacIntosh BR (2011) Less is more: standard warm- up causes fatigue and less warm-up permits greater cycling power output. J Appl Physiol; 111:228-235.
455. Tomlin DL, Wenger HA (2001) The relationship between aerobic fitness and recovery from high intensity intermittent exercise. Sports Med; 31(1):1-11.
456. Toussaint HM, Hollander AP (1994) Energetics of competitive swimming. Sports Med; 18(6):384-405.
457. Tucker R, Lambert MI, Noakes TD (2006) An analysis of pacing strategies during men's world-record performances in track athletics. Int J Sports Physiol Perform; 1:233-245.
458. Tucker R (2009) The anticipatory regulation of performance: the physiological basis for pacing strategies and the development of a perception-based model for exercise performance. Br J Sports Med; 43(6):392-400.
459. Tucker R, Noakes TD (2009) The physiological regulation of pacing strategy during exercise: a critical review. Br J Sports Med; 43: e1.
460. Turnbull JR, Kilding AE, Keogh JWL (2009) Physiology of alpine skiing. Scand J Med Sci Sports; 19:146-155.
461. Ulrich S, Cox A (2009) Using cluster analysis to examine the combinations of motivation regulations of physical education studients. J of sport and exericse psychology; 31:358-379.
462. Undgren F, Bennegard K, Elander A, Lundholm K, Schersten T, Bylund-Fellenius AC (1988) Substrate exchange in human limb muscle during exercise at reduced blood flow. Am J Physiol; 255:1156-64.
463. Van Hall G (2010) Lactate kinetics in human tissues at rest and during exercise. Acta Physiol; 199(4):499-508.
464. Vandewalle H, Peres G, Monod H (1987) Standard anaerobic exercise tests. Sports Med; 4:268-89.
465. Veicsteinas A, Ferretti G, Margonato V, Rosa G, Tagliabue D (1984) Energy cost of and energy sources for alpine skiing in top athletes. J Appl Physiol; 56:1187-90.
466. Vogler AJ, Rice AJ, Gore CJ (2010) Validity and reliability of the Cortex MetaMax3B portable metabolic system. J Sports Sci; 28:733–742
467. Vogt M, Angermann M, Jordan K, Spring H, Müller E, Hoppeler H (2005) Metabolic consequences of race-simulation slalom training in junior skiers. Leistungssport; 2: 48-54.
468. Vogt M, Hoppeler H (2012) Competitive alpine skiing: combining strength and endurance training. Molecular bases and applications. in: Müller et al. Science and Skiing; 38-47.
469. Vogt M, Hoppeler HH (2014) Eccentric exercise: mechanisms and effects when used as training regime or training adjunct. J Appl Physiol; 116:1446-54.
470. Von Duvillard SP, Hofman P, Schwaberger G, Pokan R, Meyer N, Rausch W (2000) Metabolic changes resulting from a series of consecutive supra-maximal laboratory tests in competitive alpine ski racers. in Müller et al. Science and Skiing; 469-479.

471. Von Duvillard SP (2005) Oxygentation and deoxygenation of thigh muscle tissue during ismetric and dynamic exercise in junior male and female competitive alpine ski racers. in Müller et al. Science and Skiing.
472. Von Duvillard SP, Bacharach DW, Stanek F (2009) Respiratory and metabolic demands of field versus laboratory test in young competitive alpine ski racers. in: Müller et al. Science and Skiing; 543-55.
473. Wahl AS, Buchthal B, Rode F, Bomholt SF, Freitag HE, Hardingham GE, Ronn LCB, Bading H (2009) Hypoxic/ischemic conditions induce expression of the putative pro-death gene Clca1 via activation of extrasynaptic n-methyl-d-aspartate receptors. Neuroscienc; 158:344-352.
474. Wakeling JM, Liphardt AM (2003) Task-specific recruitment of motor units for vibration damping. J Biomech; 39(7):1342-6.
475. Webb C, Mackenzie J (1993) Where are we now? Research-mindedness in the 1990s. J Clin Nurs; 2:129-33.
476. Wehrlin JP, Hallen J (2006) Linear decrease in VO_{2max} and performance with increasing altitude in endurance atheltes. Eur J Appl Physiol; 96:404-412.
477. Westerblad H, Bruton JD, Lännergren J (1997) The effect of intracellular pH on contractile function of intact, single fibres of mouse muscle declines with increasing temperature. J Physiol; 500:193–204.
478. Whelan KM, Gass EM, Moran CC (1999) Warm-up: Efficacy of a program designed for downhill skiing. Australian Journal o f Physiotherapy; 45:279-288.
479. White AT, Johnson SC (1991) Physiological comparison of international, national and regional alpine skiers. Int J Sports Med 12:374-8.
480. White AT, Johnson SC (1993) Physiological aspects and injury in elite alpine skiers. Sports Med; 15:170-178.
481. Withers RT, Sherman WM, Clark DG (1991) Muscle metabolism during 30, 60, and 90 s of maximum cycling on an air-braked ergometer. Eur J Appl Physiol; 63:354-62.
482. Winter DA, Patla AE, Frank JS (1990) Assessment of balance control in humans. Med Prog Technol; 16(1-2):31-51.
483. Wittekind AL, Beneke R (2009) Effect of warm-up on run time to exhaustion. J Sci Med Sport; 12(4):480-4.
484. Wittekind AL, D Micklewright, R Beneke (2011) Teleoanticipation in all-out short-duration cycling; Br J Sports Med; 45:114-119.
485. Wittekind AL, Cooper CE, Elwell CE, Leung TS, Beneke R (2012) Warm-up effects on muscle oxygenation, metabolism and sprint cycling performance. European J of applied physiol; 112:3129-39.
486. Woerndle W (2007) Alpiner Skilauf. In: Snowsport Austria - Die österreichische Skischule (engl.: Snowsport Austria - The Austrian Ski School). Ed: Walter, R. 3 rd edition. Purkersdorf: Hollinek; 23-128.
487. Wright RA (1998) Ability perception and cardiovascular response to behavioral challenge. in: Kofka M, Weary G, Sedek G (eds) Personal control in action: cognitive and motivational mechanisms. Guilford, New York; 197-232.
488. Wright RA (2008) Refining the Prediction of Effort: Brehm's Distinction between Potential Motivation and Motivation Intensity, Social and Personality Psychology Compass; 2(2):682-701.
489. Zamparo Z, Capelli C, Guerrini G (1999) Energetics of kayaking at submaximal and maximal speeds. Eur J Appl Physiol; 80:542-548.

490. Zamparo P, Capelli C, Cautero M, Di Nino A (2000) Energy cost of front-crawl swimming at supra-maximal speeds and underwater torque in young swimmers. Eur J Appl Physiol; 83:487-491.
491. Zamparo P, Tomadini S, Didone F, Grazzina F, Rejc E, Capelli C (2006) Bioenergetics of a slalom kayak (k1) competition. Int J Sports Med; 27(7):546-52.
492. Zamparo P, Capelli C, Pendergast D (2011) Energetics of swimming: a historical perspective. Eur J Appl Physiol; 111:367-378.
493. Zeglinksi CM, Swanson SC, Self BP, Greenwald RM (1998) Muscle activity in the slalom turn of Alpine skiing and in-line skating. Int J Sports Med; 19(7):447-454.
494. Zitoun-Florentin F (2011) Contribution à l'analyse de la relation entre la filière aérobie et les performances sportives des skieurs alpins en filière d'accès au haut niveau de 1994 à nos jours. Dissertation, University of Grenoble (France).
495. Zou J, Bretlau P, Pyykkö I, Starck J, Toppila E (2001) Sensorineural hearing loss after vibration: an animal model for evaluating prevention and treatment of inner ear hearing loss. Acta Oto-Laryngological; 121(2):143-148.
496. Zouhal H, Jabbour G, Jacob C, Duvigneau D, Botcazou M, Ben Abderrahaman A, Prioux J, Moussa E (2010) Anaerobic and aerobic energy system contribution to 400-m flat and 400-m hurdles track running. Journal of Strength and Conditioning Research; 24(9):2309-15.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Etude 1

the Journal of Strength and Conditioning Research™

Energy Demands in Well-Trained Alpine Ski Racers During Different Duration of Slalom and Giant Slalom Runs

Valentin Bottollier,[1,2,3] Nicolas Coulmy,[1] Loïc Le Quellec,[1] and Jacques Prioux[2,3]

AU2 [1]Département Sportif et Scientifique (DSS), Fédération Française de Ski (FFS), Annecy, France; [2]Ecole Normale Supérieure (ENS), Rennes, Bruz, France; and [3]Laboratoire Mouvement Sport Santé (M2S) (EA 1274), Université Rennes 2, Rennes cedex, France

Abstract

Bottollier, V, Coulmy, N, Le Quellec, L, and Prioux, J. Energy demands in well-trained alpine ski racers during different duration of slalom and giant slalom runs. *J Strength Cond Res* XX(X): 000–000, 2019—The purpose of this study was to investigate the energy demands of different duration slalom (SL) and giant slalom (GS) events in well-trained alpine ski racers. Eight well-trained alpine ski racers (age: 18.2 ± 0.8 years; stature: 1.72 ± 0.10 m; body mass: 65.8 ± 12.0 kg) performed an incremental laboratory test on cycle ergometer and 4 standardized alpine ski runs: short (ST) and long (LG) versions of SL and GS (SLST, SLLG, GSST, and GSLG). Oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) and heart rate (HR) were recorded continuously in all conditions. Blood lactate ([La]) was determined immediately before run and 3 and 5 minutes after run ([La]peak). The contribution of aerobic, glycolytic, and phosphagen energy systems was estimated. The aerobic system was the primary energy system involved in GSST (43.9 ± 5.7%) and GSLG (48.5 ± 2.5%). No significant difference in the contribution of aerobic and glycolytic systems was observed in SLST and SLLG. [La]peak was higher in SLLG (11.10 ± 2.41 mmol·L^{-1}) than in GSST (8.01 ± 2.01 mmol·L^{-1}). There was no difference in oxygen uptake peak between GSST and GSLG. Energetic training goals should focus on the improvement of both aerobic, glycolytic, and phosphagen systems for alpine ski racers who perform SL and GS. Giant slalom specialists might benefit from emphasizing the improvement of the aerobic system, without neglecting other systems.

AU3 **Key Words:** energy systems, oxygen uptake, blood lactate, alpine ski racing

Introduction

Coaches and trainers must understand the metabolic demands of the sport if they are to set accurate energetic training goals in the aim of practically specific adaptations. The winter sport of alpine ski racing mainly includes technical disciplines (slalom [SL] and giant slalom [GS]) and speed disciplines (super giant [SG] and downhill [DH]). In the technical disciplines, alpine ski racers must contend with high total ground-reaction forces (>3 N·BW^{-1}) (4,35), repeated every 0.90 ± 0.04 and 1.45 ± 0.11 seconds (35). These contractions must be sustained for between ~43 and 82 seconds, depending on the race duration, discipline, slope, and gate setting. While these characteristics might indicate the technical disciplines be classed as high-intensity, short-duration exercise to date, there is no consensus affirming glycolytic or aerobic energy system predominance (30).

During the 1980s, Veicsteinas et al. (39) and Saibene et al. (34) conducted field studies showing that the glycolytic energy system was the predominant source of energy in GS. These studies estimated the contribution of the aerobic and glycolytic energy systems using the energy balance method (11) in adults (34,39) and in children (15). However, Burtscher et al. (9) showed in their field study that aerobic metabolism plays a key role (60% of total energy expenditure) during GS. Nevertheless, these authors did not disclose the methodology used to calculate energy system contribution (9). Peak blood lactate concentration ([La]peak) has previously been reported to range between 6 and 16 mmol·L^{-1} during GS in adults (9,32,34,36,37,39). Peak oxygen uptake ($\dot{V}O_2$peak) values were observed to be between 79 and 93% of maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_2$max) during GS, which lasted 60–82 seconds (34,36). The few field studies which are commonly cited within the literature were mainly performed in the 1980s (34,39), however, and may not be characteristic of current alpine ski racing. Indeed, since the 1980s, equipment, slope preparation, and rules governing the sport have undergone significant changes (26,27). Because these changes have brought about mechanical shifts in the sport (26), it is possible that these changes impacted the metabolic demands.

On the other hand, while the physiological requirements of alpine ski racing have been reported (22,27,37,45), and hence a physiological profile for high level alpine skiers shaped, most studies draw on data gathered in laboratory conditions. Neumayr et al. (27) and Zitoun-Florentin (45) show that aerobic power is strongly correlated with success in alpine ski racing which was debated by Maffiuletti et al. (25). Laboratory study enables the AU4 ability to assess physiological parameters in high-level athletes, and a large cohort that would not necessarily be practical in on-field conditions, however, often the relationship between ski racing performance and physiological parameters measured in these conditions, does not clearly show whether such measurements are relevant or important to real-life alpine ski racing. Thus, nonspecific laboratory tests on ski racers may not provide accurate information about the energetic system contribution during real-life alpine ski racing.

Consequently, the metabolic demands of GS are still under debate while the metabolic demands of slalom (SL) have not yet

Address correspondence to Valentin Bottollier, bottoliervalentin@gmail.com.

© 2019 National Strength and Conditioning Association

Copyright © 2019 National Strength and Conditioning Association. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

been investigated. Disparate turn frequency, intensity, duration of total ground-reaction forces (35), knee angles, and knee angular velocities (5) highlight biomechanical differences between GS and SL, which may influence physiological demands. Likewise, from the few on-field studies that investigated metabolic demands, none accounted for differences in duration between competitive runs for a discipline. For modern ski racing, run duration for SL and GS is ~18 and ~28 seconds. As it is likely that metabolic differences can be observed between different durations (20), shorter and longer runs merit investigation to better understand the demands of alpine ski racing. Indeed, coaches have to set energetic training goals that enable alpine ski racers to be well prepared for performing in every competition situation. These factors have the possibility of both improving performance and reducing injury risks. The purpose of this study was to investigate the physiological demands ($\dot{V}O_2$, [La] and heart rate [HR]) and estimate the contributions of energy metabolisms (aerobic, glycolytic, and phosphagen) during different durations of GS and SL in well-trained alpine ski racers. We hypothesized that both alpine ski discipline (SL or GS) and run duration would produce different physiological demands.

Methods

Experimental Approach to the Problem

Subjects performed 4 field tests, each separated by at least 24-hour rest, over an 8-day period during the competitive winter season. Subjects performed in a random order 2 standardized SL (SLST and SLLG) and 2 standardized GS (GSST and GSLG). Durations of the short and long events were set using the end ranges (i.e., fastest and slowest times, respectively) determined from the performances of the World Cup (WC) and European Cup (EC) races from the previous 2 competitive seasons. The number of gates relative to vertical runs was set in accordance with WC and EC regulations, as per the International Ski Federation (FIS) institution rules. To replicate competition conditions, subjects were instructed to perform a self-conducted warm-up, typical of a competition event, and to repeat the same warm-up for each of the 4 test sessions. After the warm-up, a portable gas exchange system and HR monitor were attached to the subject's chest. All the field tests were performed with FIS approved, prepared skis and on the same slope, which is FIS approved for international SL and GS competitions. Subjects were instructed to standardize their diet, and meals took place at the same place and hour before each test. Subjects were instructed to abstain from alcohol and strenuous activities for at least 24 hours before testing. Three to 5 days after the field tests, subjects performed a laboratory-based maximal graded test on a cycle ergometer to determine $\dot{V}O_2$max. All subjects participated in a laboratory and test familiarization session. The study conformed to the recommendations of the Declaration of Helsinki and was approved by the local ethics committee.

Subjects

Eight well-trained alpine ski racers (4 male, 4 female, age 18.2 ± 0.8 [16.8–19.3] years, height 1.72 ± 0.10 m, and body mass 65.8 ± 12.0 kg) volunteered for the study. They trained on-field at least 5 days a week for alpine skiing during the winter season. All the subjects were active competitive athletes and competed in international races with an average performance of 66.4 ± 11.7 FIS points. Before the tests, all athletes and athlete's parents for 3 underage (17 years old) were informed of the procedures, including the possible risks involved and benefit and signed an institutionally approved informed consent form.

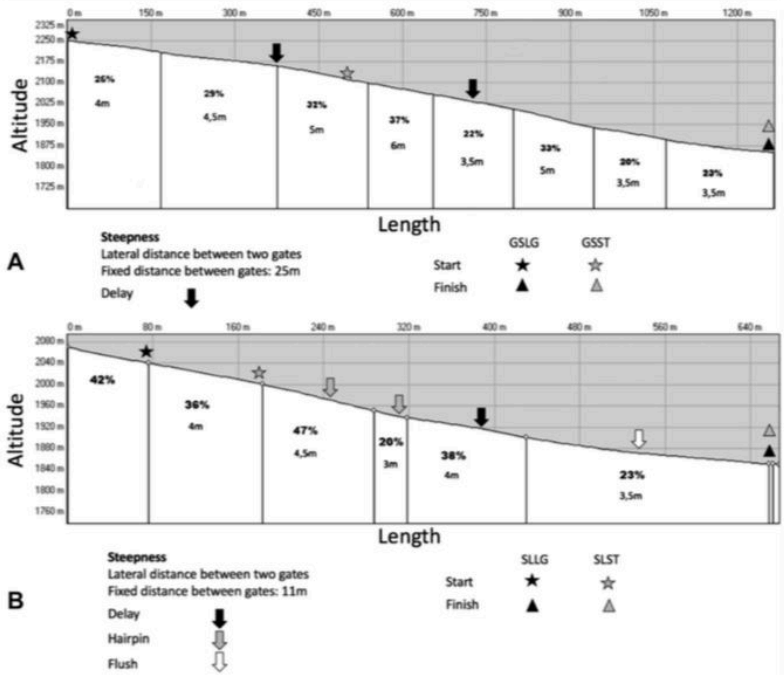
Procedures

Before each testing session (8 AM), experts (previous national level coaches) carefully prepared gates on a groomed slope depicted in Figure 1. Number of gates, number of turns, and slope length were chosen to simulate actual high-level competition according to the rules of the FIS (Figure 1). Lengths between gates were set to 11 m for SL and 25 m for GS. Institution rules do not set lateral length between gates. To reproduce competition conditions, lateral lengths between gates were standardized and adjusted regarding the steepness of each slope section according to average racing difficulty as presented in Figure 1. Length between gates and lateral length between gates were measured by measuring tape and replicated between ST and LG sessions. The finish areas were the same for all 4 events. SLLG and GSLG starts were set higher on the slope than SLST and GSST, respectively, to replicate maximal competitive duration of SL and GS. Maximal and minimal competitive durations were calculated from the time performed by the winners of all WC and EC races from the previous 2 seasons (Figure 2). Subjects completed the full test distance for each respective event. The 4 field testing sessions were conducted within a 2-hour block in a 6-hour window (between 9 AM and 3 PM) to minimize the effects of diurnal biological variation. All tests were conducted under similar environmental conditions (luminosity, between sunny without any clouds and sunny with few clouds; air temperature, between −4 and +2° C; snow temperature −5 ± 0° C; wind, between 0 and 12 km·h^{-1}), with start and finish altitudes described in Figure 1.

Maximal Graded Tests. Maximal aerobic uptake ($\dot{V}O_2$max) was determined using a continuous maximal graded test conducted on a laboratory-based cycle ergometer (Erg 550; Bosch, Gerlingen, Germany). Subjects were continuously monitored, and provided with strong verbal encouragement to persist and to keep pace at 80 rotations per minute (rpm) throughout the experiment. The resistance was set at a power of 80 W, which was then increased by 25 W every minute until exhaustion (17). Maximal aerobic power (MAP) was recorded. Oxygen uptake and HR were recorded continuously, and a blood sample was taken 3 minutes after test. The $\dot{V}O_2$max corresponded to the highest $\dot{V}O_2$ attained in 2 successive 15-second periods for the continuous maximal graded test. Individual $\dot{V}O_2$max was attained when 3 or more of the following criteria were observed: (a) a steady state of $\dot{V}O_2$ despite increasing power (change in $\dot{V}O_2$ at $\dot{V}O_2$max ≤ 150 ml·min^{-1}); 2) a final respiratory exchange ratio [RER] higher than 1.1; (c) visible subject exhaustion; and (d) an HR at the end of exercise within 10 b·min^{-1} of the predicted maximum (210 − [0.65 × age]).

Respiratory Gas Exchange and Heart Rate Measurements. Oxygen uptake and carbon dioxide output ($\dot{V}CO_2$) were recorded continuously (breath-by-breath) using a portable gas exchange system (Metamax, Cortex, Leipzig, Germany). Before each test, the oxygen (O_2) and carbon dioxide (CO_2) analysis systems were calibrated using ambient air and a gas with known O_2 and CO_2 concentrations (16 and 5%, respectively). The calibration of the metamax turbine flow meter was performed using a 3,000-ml syringe (Cortex). In the field tests, start HR (HR_{start}), mean HR (HR_{mean}), and peak HR (HRpeak) were measured and recorded

Copyright © 2019 National Strength and Conditioning Association. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.



AU13 **Figure 1.** Giant slalom (A) and slalom (B) characterization. SLST = short slalom; SLLG = long slalom; GSST = short giant slalom; GSLG = long giant slalom.

with an HR monitor (V800 and H7; Polar, Kempele, Finland) for each skier. Times from the beginning of gas exchange and HR measurements to the start of the test were recorded to determine the exact start time in the data files. Breath-by-breath gas exchange values were averaged with a 5-second central moving average to obtain $\dot{V}O_2$max, peak $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_2$peak), and RER_{mean}. $\dot{V}O_2$ was also averaged every 5 seconds ($\dot{V}O_{2average}$). As suggested by Lamarra et al. (24), breath-by-breath values that were 3 *SD*s from the local mean were removed from the analysis. $\dot{V}O_2$peak and $\dot{V}O_{2mean}$ were expressed in percentage of $\dot{V}O_2$max. Altitude difference between the $\dot{V}O_2$max test (479 m) and the mean of the runs were calculated. Approximately 6.3% for 1,000-m altitude difference were applied to $\dot{V}O_2$max to express relative $\dot{V}O_2$max at run altitude (40).

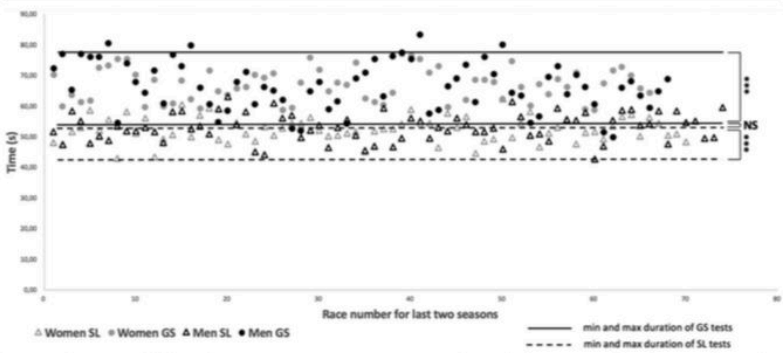


Figure 2. Giant slalom (GS) and SL winner time during last 2 seasons of WC and EC. SL = slalom; EC = European Cup; WC = World Cup. ***Significant difference between test durations. $p < 0.001$; NS = no significant difference between test durations.

Copyright © 2019 National Strength and Conditioning Association. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

Lactate Determination and Rate of Perceived Exertion. Blood drawn from the fingertip (3 μl) was sampled at rest before the field test and 3 and 5 minutes after the field test (in a standing posture) to measure [La] using a portable analyzer (Lactate Pro 2; Arkray, Kyoto, Japan). Peak blood lactate concentration ([La]peak) was considered to be the highest values of [La] obtained in the third and fifth minutes of recovery. Delta (Δ) [La] was calculated as the difference between [La]peak and [La] measured at rest. Three minutes after the completion of the field test, the subjects were asked to indicate their rate of perceived exertion (RPE) using Borg's scale ranging 6–20 (8).

Energy System Contribution Calculation. Estimates of aerobic metabolism use were calculated through the integral $\dot{V}O_2$ applying an oxygen equivalent of 20.9 $kJ \cdot L^{-1}$ O_2^{-1} (6). Estimates of anaerobic metabolism use were calculated through lactic and alactic components. First, Δ[La] was calculated as the highest [La] after the field test minus [La] at the beginning of the field test. A value of 1 $mmol \cdot L^{-1}$ Δ[La] is considered to be equivalent to 3-ml $O_2 \cdot kg^{-1}$ body mass (6). Second, phosphagen energy system contribution (ΔEaLa) was estimated based on 416 $J \cdot kg^{-1}$ of body mass according to the depletion of phosphocreatine (PCr) stores in active muscle during exhaustive exercise (44).

Total energetic output (ΔE in $kJ \cdot min^{-1}$) was calculated using the following equation (6):

$$\Delta E = \Delta EaLa + \Delta E[La] + \Delta E\ O_2. \quad (1)$$

In this way, aerobic, glycolytic, and phosphagen energy system contributions were expressed in total energetic output percentage.

Statistical Analyses

Data are reported as mean ± *SD*. On the basis of a power analysis (desired power = 0.80 and an alpha error = 0.05), we determined that a sample size of $n = 8$ would be sufficient to study metabolic demands of alpine ski racing events. Effect sizes (ES) were calculated using Cohen's *d*. Effect sizes of ≤0.2, 0.21–0.60, 0.61–1.20, 1.21–2.0, and ≥2.0 were, respectively, considered as trivial, small, moderate, large, and very large (3). The ES were calculated from the means and the variances (allowing the calculation of the *SD*) from the linear mixed-effects models. When significant difference was observed, the percentage of difference between the 2 values was presented with 95% confidence interval (CI). Between and within comparisons across tests of relative aerobic and glycolytic system contributions, start oxygen uptake ($\dot{V}O_{2start}$), $\dot{V}O_{2mean}$, $\dot{V}O_2$peak, RER_{mean}, HR_{start}, HR_{mean}, HRpeak, [La]peak, Δ[La], and RPE were performed using a two-way analysis of variance (XLStat 2017, Paris, France). Honest significant difference Tukey and Student-Newman-Keuls post hoc tests were used in the case of significant main effect and interactions, respectively. The level of significance was set at $p < 0.05$.

Results

Maximal Graded Test

$\dot{V}O_2$max, HRmax, and MAP were 57.9 ± 6.7 $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ (95% CI: 52.3–63.5), 197 ± 4 $b \cdot min^{-1}$ (95% CI: 194–200), and 290.6 ± 68.3 W (95% CI: 233.5–347.7), respectively.

Run Duration

Performance, physiological variables, and the contribution of energy systems during SLST, SLLG, GSST, and GSLG are presented in Table 1. There were significant differences between SLST and SLLG duration ($p < 0.001$; +20.7%; $d = 1.6$; ES: large; SLST 95% CI: 40.63–47.11 seconds; SLLG 95% CI: 50.47–55.41 seconds) and between GSST and GSLG duration ($p < 0.001$; +47.3%; $d = 1.9$; ES: large; GSST 95% CI: 52.33–54.03 seconds; GSLG 95% CI: 77.17–79.53 seconds). No significant difference was found between SLLG and GSST duration. [T1]

Blood Lactate Concentration

The [La] pretest values were not significantly different between the 4 tests (Table 1). [La]peak values (Table 1) determined at the end of the SLST and SLLG were not different. However, significant differences ($p < 0.05$; +34.2%; $d = 1.1$; ES: moderate) in [La]peak values were observed between GSST (95% CI: 6.3–9.7 $mmol \cdot L^{-1}$) and GSLG (95% CI: 9.1–12.4 $mmol \cdot L^{-1}$). [La]peak value was lower ($p < 0.01$; +38.5%; $d = 1.2$; ES: moderate) in GSST than in SLLG (95% CI: 9.1–13.1 $mmol \cdot L^{-1}$).

Table 1
Mean (± *SD*) of variables measured during SLST, SLLG, GSST, and GSLG.*

Parameters	SLST	SLLG	GSST	GSLG
Slalom duration (s)	43.87†‡§ (3.87)	52.94§ (2.96)	53.18§ (1.02)	78.35† (1.41)
$\dot{V}O_2$peak (%$\dot{V}O_2$max)	76.9‖ (6.2)	83.7 (5.8)	77.6 (10.6)	80.9 (11.0)
RER_{mean}	1.15 (0.10)	1.12 (0.10)	1.12 (0.08)	1.15 (0.12)
HR_{start} (% HRmax)	73.3 (7.3)	72.5 (6.5)	69.7 (10.5)	71.1 (7.2)
HRpeak (% HRmax)	94.5¶ (1.6)	94.3 (3.1)	94.1 (3.5)	96.4 (1.6)
$[La]_{pre}$ ($mmol \cdot L^{-1}$)	1.7 (0.4)	1.9 (0.4)	2.0 (0.9)	1.5 (0.4)
[La]peak ($mmol \cdot L^{-1}$)	10.2 (2.6)	11.1# (2.4)	8.0 (2.0)	10.8# (2.0)
Δ[La] ($mmol \cdot L^{-1}$)	8.5 (3.0)	9.2# (2.4)	6.0** (1.9)	9.3 (1.8)
RPE	14.0** (1.3)	15.4‡ (1.4)	13.4§ (0.7)	15.9 (1.0)

*SLST = short slalom; SLLG = long slalom; GSST = short giant slalom; GSLG = long giant slalom; $\dot{V}O_2$peak = peak oxygen uptake; RER_{mean} = mean respiratory exchange ratio; HR_{start} = heart rate at start; HRpeak = peak heart rate; $[La]_{pre}$ = blood lactate concentration at start; $[La]_{pre}$ = peak blood lactate concentration; Δ[La] = difference between peak blood lactate concentration measured during recovery and blood lactate concentration measured at start; RPE = rate of perceived exertion.
†Significantly different from SLLG: $p < 0.001$.
‡Significantly different from GSST: $p < 0.01$.
§Significantly different from GSLG: $p < 0.001$.
‖Significantly different from SLLG: $p < 0.05$.
¶Significantly different from GSLG: $p < 0.05$.
#Significantly different from GSST: $p < 0.05$.
**Significantly different from GSLG: $p < 0.01$.

Copyright © 2019 National Strength and Conditioning Association. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

Aerobic and Glycolytic System Contribution

[F3] Figure 3 shows the aerobic, glycolytic, and phosphagen system contributions from the SLST, SLLG, GSST, and GSLG. The aerobic system was the primary energy source in GSST ($p < 0.001$; +65.4%; $d = 1.6$; ES: large and $p < 0.001$; +48.6%; $d = 1.7$; ES: large) and GSLG ($p < 0.001$; +62.2%; $d = 1.8$; ES: large and $p < 0.001$; +114.3%; $d = 1.9$; ES: large) in comparison with glycolytic and phosphagen systems, respectively. The phosphagen system contributed the least energy in SLLG ($p < 0.001$; +56.4%; $d = 1.7$; ES: large and $p < 0.01$; +15.3%; $d = 1.4$; ES: large) and in GSLG ($p < 0.001$; +124.4%; $d = 1.9$; ES: large and $p < 0.001$; +38.3%; $d = 1.6$; ES: large) in comparison with aerobic and glycolytic systems, respectively. No differences in energy system contribution were observed in SLST.

[F4] Total aerobic, glycolytic, and phosphagen energy outputs during SLST, SLLG, GSST, and GSLG are represented in Figure 4. Total energy outputs were significantly different between SLST and GSLG ($p < 0.05$; +31.9%; $d = 1.1$; ES: moderate; SLST 95% CI: 107.9–149.7 kJ·min^{-1}; GSLG 95% CI: 81.0–114.2 kJ·min^{-1}) and between SLLG and GSLG ($p < 0.05$; +25.2%; $d = 1.0$; ES: moderate; SLLG 95% CI: 105.6–138.8 kJ·min^{-1}). There were no differences observed in aerobic energy outputs between SLST, SLLG, GSST, and GSLG. Glycolytic energy output was significantly lower in GSST (95% CI: 20.5–34.9 kJ·min^{-1}) than in SLST ($p < 0.01$; +69.1%; $d = 1.2$; ES: large; 95% CI: 33.9–59.7 kJ·min^{-1}) and SLLG ($p < 0.01$; +50.1%; $d = 1.3$; ES: large; 95% CI: 35.7–47.5 kJ·min^{-1}). Glycolytic energy output was also significantly lower in GSLG (95% CI: 23.4–35.0 kJ·min^{-1}) than in SLST ($p < 0.05$; +60.6%; $d = 1.2$; ES: large) and SLLG ($p < 0.01$; +42.6%; $d = 1.3$; ES: large). Phosphagen energy output was significantly lower in GSLG (95% CI: 17.6–24.4 kJ·min^{-1}) than in SLST ($p < 0.001$; +81.1%; $d = 1.5$; ES: large; 95% CI: 30.1–45.9 kJ·min^{-1}), SLLG ($p < 0.01$; +49.1%; $d = 1.3$; ES: large; 95% CI: 25.3–37.3 kJ·min^{-1}), and GSST ($p < 0.01$; +47.2%; $d = 1.4$; ES: large; 95% CI: 26.0–35.8 kJ·min^{-1}).

Cardiorespiratory Parameters

$\dot{V}O_2$peak was higher in SLLG (95% CI: 78.9–88.5%) than in SLST ($p < 0.05$; +8.9%; $d = 1.0$; ES: moderate; 95% CI: 71.7–82.1%). There were no differences in $\dot{V}O_2$peak between GSST and GSLG and between SLLG and GSST (Table 1). For both HR_{start} and HRpeak, there were no significant differences between SLST and SLLG, GSST and GSLG, and SLLG and GSST (Table 1). HRpeak was significantly higher in GSLG (95% CI: 95.1–97.7%) than in SLST ($p < 0.05$; +2.2%; $d = 1.1$; ES: moderate; 95% CI: 93.2–95.8%). Finally, RER_{mean} values were higher than 1.1. There were no differences in RER_{mean} between SLST, SLLG, GSST, and GSLG (Table 1).

[F5] Figure 5 displays average 5-second $\dot{V}O_2$, expressed relative to $\dot{V}O_2$max, for SLST, SLLG, GSST, and GSLG. From 55 seconds until the end of GSLG, $\dot{V}O_2$ remained constant. No differences were observed in $\dot{V}O_{2average}$ between GSST and GSLG. From 0 second until 10 seconds, there was a significant difference between SLST and SLLG ($p < 0.05$), but from 10 seconds until 45 seconds, there were no differences in $\dot{V}O_{2average}$ between SLST and SLLG. $\dot{V}O_{2average}$ was significantly higher in SLLG than in GSST between 25 and 30 seconds and at the end of the run ($p < 0.05$).

Rating of Perceived Exertion

The RPE scores are presented in Table 1. Rate of perceived exertion was significantly higher in GSLG (95% CI: 15.1–16.7) than in GSST ($p < 0.001$; +18.7%; $d = 1.6$; ES: large; 95% CI: 12.8–14.0) and in SLST ($p < 0.01$; +13.4%; $d = 1.3$; ES: large; 95% CI: 12.9–15.1). Rate of perceived exertion was also higher ($p < 0.01$; +15.0%; $d = 1.3$; ES: large) in SLLG (95% CI: 14.2–16.6) than in GSST. No other significant differences in RPE were observed.

Discussion

[AU8]

The aim of this study was to investigate the physiological demands and estimate the contributions of the different energy systems, during varying durations of GS and SL in well-trained alpine ski racers. To the best of our knowledge, this study is the first to report the contribution of the energy systems in SL, between SL and GS and between ST and LG durations in contemporary alpine ski racing.

The results from this study (Figure 3) suggest that the aerobic system is the primary energy source in GS performance ($p < 0.001$), accounting for 48.5 ± 2.5% of total energy output for GSLG (vs. 29.9 ± 3.6 and 21.6 ± 1.8% for glycolytic and phosphagen systems, respectively) and 43.9 ± 5.7% for GSST (vs. 26.5 ± 6.8 and 29.6 ± 2.0% for glycolytic and phosphagen systems, respectively). By contrast, there was no difference observed between the aerobic and glycolytic system contribution to

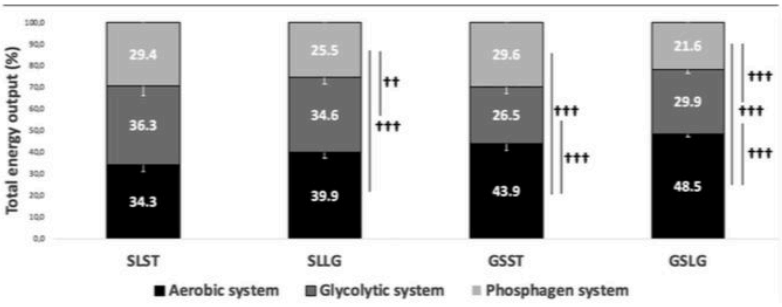


Figure 3. Percentage contribution of the aerobic, glycolytic, and phosphagen energy sources to the total energy output in SLST, SLLG, GSST, and GSLG. SLST = short slalom; SLLG = long slalom; GSST = short giant slalom; GSLG = long giant slalom. †Significant difference between energy system contributions on total energy output inside a test. ††$p < 0.01$; †††$p < 0.001$.

Copyright © 2019 National Strength and Conditioning Association. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

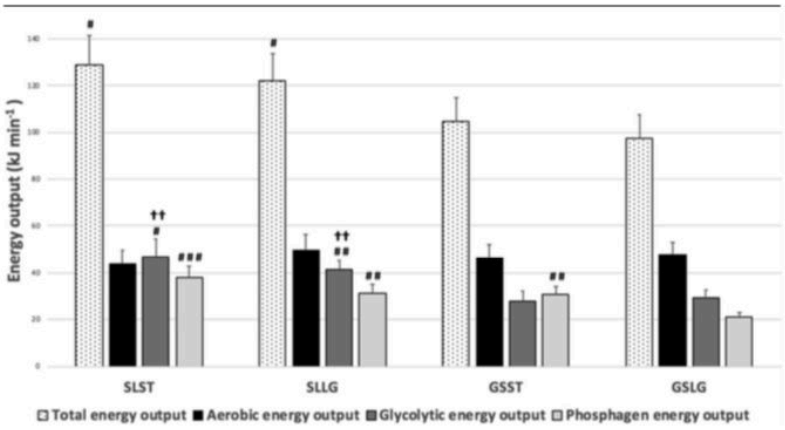


Figure 4. Total, aerobic, glycolytic, and phosphagen energy output during SLST, SLLG, GSST, and GSLG. SLST = short slalom; SLLG = long slalom; GSST = short giant slalom; GSLG = long giant slalom. *Significant difference from SLLG: **$p < 0.01$. †Significant difference from GSST: ††$p < 0.01$. #Significant difference from GSLG: #$p < 0.05$; ##$p < 0.01$; ###$p < 0.001$.

total energy output in SLST (34.3 ± 6.4 and 36.3 ± 9.1%, respectively) and SLLG (39.9 ± 4.7 and 34.6 ± 6.3%, respectively). Moreover, glycolytic energy output is higher in SL (ST and LG) than in GS (ST and LG). Concerning the run duration (Figure 4), our results indicate that total, aerobic, and glycolytic energy outputs were not significantly different between SLST and SLLG and between GSST and GSLG. Finally, the RER_{mean} was higher than 1.1 in all groups. Thus, alpine ski racing technical disciplines (SL vs. GS) seem to associate with different physiological demands, as suggested in our hypothesis. However, contrary to our hypothesis, alpine ski racing run duration (ST vs. LG) appears not to be associated with different physiological demands. Each of the 4 field tests were conducted under similar environmental conditions of luminosity, air temperature, snow temperature, and wind. However, due to a lack of knowledge regarding the influence of visibility and snow quality on energy system contribution in alpine ski racing, it remains difficult to generalize our results; environmental conditions and characteristics of alpine ski racing runs can vary significantly between races; however, the degree to which this impacts performance metrics is unclear.

Regarding the contribution of the aerobic system to GSLG performance (48.5 ± 2.5%), our findings are between Veicteinas

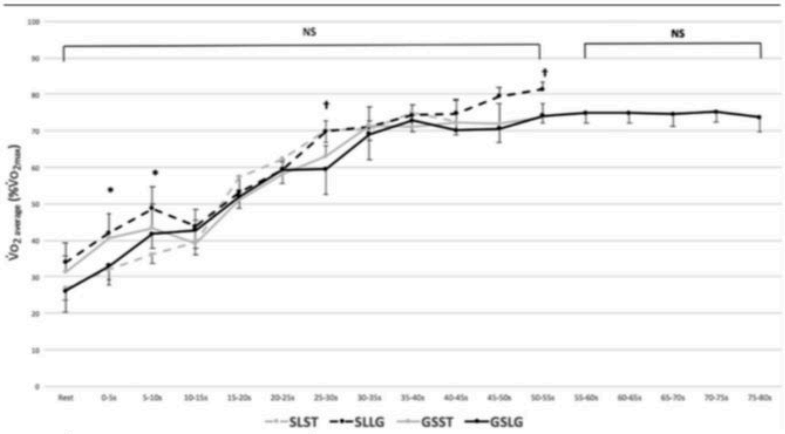


Figure 5. $\dot{V}O_{2average}$, expressed in percentage of $\dot{V}O_2max$, as a function of time (seconds) in SLST, SLLG, GSST, and GSLG. $\dot{V}O_{2average}$ = 5-second average oxygen uptake; SLST = short slalom; SLLG = long slalom; GSST = short giant slalom; GSLG = long giant slalom. *Significant difference on $\dot{V}O_{2average}$ between SLST and SLLG. *$p < 0.05$. †Significant difference on $\dot{V}O_{2average}$ between SLLG and GSST. †$p < 0.05$. NS = no significant difference on $\dot{V}O_{2average}$ between GSST and GSLG. **NS** = no significant difference on GSLG $\dot{V}O_{2average}$.

Copyright © 2019 National Strength and Conditioning Association. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

et al. (39) and Saibene et al. (34) results (30–46%) and Burtscher et al. (9) results (~60%). However, in line with Burtscher et al. (9) and contrary to Veicsteinas et al. (39) and Saibene et al. (34) results, our findings suggest that the aerobic metabolism is the primary source of energy in GS. However, it is possible that any differences observed in the literature are due to differences in methodology. Indeed, Veicsteinas et al. (39) measured energy system implications during GS at an altitude of 2,850 m, which is higher than our study, and could have feasibly effected $\dot{V}O_2$ measurements (40). Furthermore, it is possible the data in early studies were influenced by the use of Douglas Bags, which may limit skier's mobility and may disturb trajectory (34,39). Moreover, as a result of using smaller Douglas Bags, Saibene et al. (34) measured $\dot{V}O_2$ in 3 sections during 3 run sessions per subject, which likely resulted in the inclusion of fatigue in their data. These differences might also be attributed to the evolution of alpine ski racing equipment and slope preparation (26,27). Indeed, the appearance of parabolic skis enables carving turns with less dispersion of energy due to skidding and tighter turns involving higher centripetal forces (26), which increase with tight turn radii AU9 and/or high speed. Thus, skiers are subject to greater total ground-reaction forces. As greater muscular demands result from these changes, it seems logical that this may influence $\dot{V}O_2$ kinetics (7) and aerobic performance demands. More widely, many authors (9,15,27,34,37,39,45) have discussed the importance of aerobic metabolism in racing scenarios. A misplaced interpretation of Howald's curve (20) often leads coaches to conclude that (a) aerobic only produces energy for extended exercise durations and (b) only 1 energy system works for a period of maximal intensity exercise (13). Considering that, first, the aerobic system produces energy from short exercise durations (13), which is interesting for alpine ski racers when considering the relative brevity of competitive events. Second, because energy systems work together (1), for a set energy demand, possessing a highly developed aerobic system may help to reduce the contribution of the glycolytic system. Given a product of the glycolytic system is an accumulation of metabolites that can negatively impact the ability to maintain longer duration maximal performance (23), accumulating less metabolites could be an attractive proposition in the effort of maintaining exercise intensity to the end of long runs. Moreover, high $\dot{V}O_2$max is also relevant in dealing with hypoxic stress, to sustain high training load and to recover effectively (27). These benefits provide strength to the argument of setting aerobic development as a key physiological goal in alpine ski racing training.

Our data also show differences in the contribution of the energy system between SL and GS. When comparing SLLG and GSST (same duration), glycolytic system output ($p < 0.01$), [La] peak, and RPE were significantly higher ($p < 0.01$) in SLLG than in GSST, and no significant aerobic system output difference was identified between these 2 field tests. The glycolytic system predominance in SLLG when compared with GSST is probably a consequence of biomechanical differences between specialties. Indeed, Spörri et al. (35) have shown that turn duration is significantly different between SL (0.90 ± 0.04 seconds) and GS (1.45 ± 0.11 seconds) and that turn frequency is higher in SL than in GS (35). Moreover, SL is characterized by greater (2.13 ± 0.37 $N \cdot BW^{-1}$ vs. 1.68 ± 0.32 $N \cdot BW^{-1}$) and proportionally shorter total ground-reaction forces than GS (35). Finally, knee angle of the outside leg (98–111° vs. 86–114°) and knee angular velocities (69 ± 11 vs. 34 ± 2 $°\cdot s^{-1}$) are higher in SL than in GS (5).

Figure 5 shows (a) that $\dot{V}O_2$ increase is quite similar for all tests and (b) that around 35–40 seconds is required to achieve an important level of $\dot{V}O_2$ (between 70 and 75% of $\dot{V}O_2$max). This duration to achieve 70–75% of $\dot{V}O_2$max seems long (13), considering that 94% of $\dot{V}O_2$max has been reached in less than 25 seconds by well-trained athletes during a 400-m race (16). Fast $\dot{V}O_2$ kinetics depend on aerobic training level and cardiorespiratory warm-up quality (41). First, subjects in our study have similar $\dot{V}O_2$max to members of the Austrian and French national ski teams (27,45). However, while alpine ski racers perform some aerobic training, this is often not the central focus of programs; this partly explains why $\dot{V}O_2$max scores from high-level athletes are generally far less than those of endurance sports specialists. Second, to replicate the energy demands of competition, subjects were instructed to perform a self-conducted warm-up identical to their habitual preparation for competition. However, it is possible that warm-up quality might be questionable regarding low $\dot{V}O_{2start}$ values (between 26.1 and 34.0% of $\dot{V}O_2$max) (Figure 5) and $\dot{V}O_2$ kinetics. It is a challenge for coaches to provide a good cardiorespiratory warm-up in alpine ski racing environments. Indeed, a well-designed cardiorespiratory warm-up can increase aerobic contribution and can decrease glycolytic system implication in total energy output (41). This may decrease metabolites coming from glycolytic system and limit the accumulation of hydrogen ions and muscular acidosis (33). Consequently, $\dot{V}O_2$ kinetics results may raise questions around the warm-up quality for alpine ski racing.

The lowest $\dot{V}O_2$peak was found in SLST (76.9 ± 6.2% of $\dot{V}O_2$max), and the highest was found in SLLG (83.7 ± 5.8% of $\dot{V}O_2$max) (Table 1). Contrary to GS events, a steady-state $\dot{V}O_2$ may not be reached in SLLG. The lower $\dot{V}O_2$peak recorded in AU10 SLST is owing to the limited test time that ended before a steady-state $\dot{V}O_2$ could be reached (42). Our results appear lower than those observed in adult skiers (between 79 and 93% of $\dot{V}O_2$max) during 60–82 seconds (34,36). This difference might be due to material evolution and slope discrepancy. Therefore, it remains difficult to compare results due to the lack of precision regarding the alpine ski racing environment in these studies. Our results also show that $\dot{V}O_2$max is never reached whatever the duration or the alpine ski racing technical discipline. These results could be explained by the predominance (4) of low-energy cost eccentric muscular contractions (31). Furthermore, alpine ski racing produces important ischemia on lower limbs (5), which decreases muscular oxygenation (19) and probably $\dot{V}O_2$ (37). In line with previous study (22), HRpeak is about 95% of HRmax, regardless of the discipline or run duration. The differences of level observed between HRpeak (around 95% of HRmax) and $\dot{V}O_2$peak (between 76.9 ± 6.2 and 83.7 ± 5.8% of $\dot{V}O_2$max) are usually observed in the literature (10). Like in previous alpine ski racing study (22), HR_{start} is very high (between 69.7 and 73.2% of HRmax) (Table 1). However, $\dot{V}O_{2start}$ values are low (between 26.1 and 34.0% of $\dot{V}O_2$max) (Figure 5). The difference of level observed between HR_{start} and $\dot{V}O_2$ at rest may be due to HR sensitivity in relation to the skier's level of calm and headspace at the time of testing (18). Concerning SL, $\dot{V}O_2$peak is significantly higher ($p < 0.05$) in SLLG (83.7 ± 5.8% of $\dot{V}O_2$max) than in SLST (76.9 ± 6.2% of $\dot{V}O_2$max). There was instead no difference in $\dot{V}O_2$peak between GSST and GSLG and between SLLG and GSST (Table 1). From 55 seconds until the end of GSLG, $\dot{V}O_{2average}$ remained below 75% of $\dot{V}O_2$max, and no significant increase was observed (Figure 5). And, interestingly, Zamparo et al. (43) observe the same steady-state $\dot{V}O_2$ (about 77% of $\dot{V}O_2$max) in slalom kayaking from 60 seconds to the end of the exercise (86 seconds). Thus, this steady-state $\dot{V}O_2$ seems to correspond to O_2 requirements for those types of effort. [La] for this level of

Copyright © 2019 National Strength and Conditioning Association. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

intensity should be below 4 mmol·L^{-1} (23); however, [La]peak values in our study were 10.2 ± 2.6 mmol·L^{-1} for SLST, 11.1 ± 2.4 mmol·L^{-1} for SLLG, 8.0 ± 2.0 mmol·L^{-1} for GSST, and 10.8 ± 2.0 mmol·L^{-1} for GSLG (Table 1). These values are in line with alpine ski racing field studies (9,32,34,36,37,39), although our data are lower than [La]max values observed in alpine ski racers during physical testing or strength and conditioning, which can reach between 20 and 25 mmol·L^{-1} (18,22,36). The question is why alpine ski racers have significantly lower [La] max during maximal field effort than in maximal dryland effort? Complex perceptive-decisional matters that alpine ski racers have to deal with might explain it. Indeed, the variability of environmental characteristics for alpine ski racing provides several distinct perceptive challenges: (a) snow quality (deterioration and regularity), (b) regularity of gates and horizontal and vertical lengths between gates, (c) slope steepness and orientation, and (d) visibility. For example, in the sport of slalom kayaking—which features similar environment variability to alpine ski racing—researchers have shown [La]peak is 30% lower than during flat water kayaking all-out tests of the same duration (43). In both slalom kayaking and alpine ski racing, athletes can be disqualified if they do not respect the setting of gates, which requires athletes to sustain high energy expenditure while dealing with dynamic balance control and trajectory precision in variable environments. To further compound the situation, precision and dynamic balance control decline with muscular fatigue (21). According to central governor theory (28), the central nervous system integrates physiological and emotional state feedback (12) to modulate effort intensity. Physiological feedback may be about muscular acidosis level (38) and muscular eccentric contraction level (2)—both of which are characteristic of alpine ski racing. Affective state can result from knowledge of duration and the difficulty level of the remaining trial (38). Speed modulations of the athlete depend on their confidence to reach the finish line without risking falling, getting injured, or reaching maximal acceptable pain if they keep the same pace to finish line (12,38). At any moment during the exercise, the athlete can (a) reduce speed to an acceptable threshold regarding disqualification risks or (b) enhance speed if this enhancement does not unnecessarily increase the chances of disqualification or if it was not already maximal or (c) maintain speed. When speed decreases, the run duration is longer, and the performance is worse. Following this thinking, the physiological limiting of alpine ski racing performance may be the complex management of high muscular constraints, dynamic balance, and trajectory precision in context of serious muscular acidosis, in highly variable environments. To aid in maintaining optimal speed, physiological training should include alpine ski racing perceptive-decisional matters. Without it, no specific training can ensure a physiological training transfer to practical, on-field performance.

The 4 field tests in this study are in line with FIS rules, which regulate differences in altitude from the top to bottom of the run, number of gates and turns regarding this difference in altitude, and minimum/maximum length between gates. However, 1 limitation of this study is that course setters can set very different runs on the same slope, setting different length between gates and lateral length between gates (14), which is unregulated. There is a lack of knowledge regarding the influence of length between gates, lateral length between gates, and slope profile on physiological parameters. The absence of testing in different environmental conditions (e.g., visibility and snow quality) and different run characteristics have to be considered as limitations when comparing our results with other field studies. Moreover, new portable devices designed to measure real-time changes in acceleration during team sport for conversion to metabolic power and to estimate a more accurate anaerobic contribution (29) are considered to be an interesting perspective for use in studies on alpine skiing.

Practical Applications

Skiers who perform SL and GS should train aerobic power, glycolytic, and phosphagen systems to be well prepared for performing in every competitive situation (from SLST to GSLG). Giant slalom specialists should emphasize the development of aerobic power skills without neglecting glycolytic and phosphagen system skills. This information will help trainers and coaches to program the ratio between aerobic, glycolytic, and phosphagen system training sessions more effectively. In addition, when the aim of ski racing training is only technical improvement (without a specific physiological goal, which is often the case), to maintain technical quality of the run from the beginning to the end of the training, training run durations should be shorter in SL than in GS. Coaches should consider the quality of the cardiorespiratory warm-up during alpine ski racing training, and in particular competition scenarios. Considering that alpine ski racing perceptive-decisional matters may limit alpine ski racing speed, coaches should focus physiological training stimuli that include the complex management in highly variable environment of high muscular constraints, dynamic balance, and trajectory precision in context of serious muscular acidosis. This training strategy should improve transferability of physical capacities to alpine ski racing performance.

Acknowledgments

The authors are grateful to athletes for their kind cooperation in the study and coaches for their technical assistance.
The authors declare that they have no conflict of interest.

References

1. Astrand PO, Rodahl K. *Textbook of Work Physiology* (Vol. 134) (2nd ed.). New York, NY: McGraw-Hill, 1997. pp. 598–625.
2. Baron B, Deruelle F, Moullan F, et al. The eccentric muscle loading influences the pacing strategies during repeated downhill sprint intervals. *Eur J Appl Physiol* 105: 749–757, 2009.
3. Batterham AM, Hopkins WG. Making meaningful inferences about magnitudes. *Int J Sports Physiol Perform* 1: 50–57, 2006.
4. Berg HE, Eiken O, Tesch PA. Involvement of eccentric muscle actions in giant slalom racing. *Med Sci Sports Exerc* 27: 1666–1670, 1995.
5. Berg HE, Eiken O. Muscle control in elite alpine skiing. *Med Sci Sports Exerc* 31: 1065–1067, 1999.
6. Bertuzzi R, Melegati J, Bueno S, et al. GEDAE-LaB: A free software to calculate the energy system contributions during exercise. *PLoS One* 11: e0145733, 2016.
7. Bishop D, Bonetti D, Dawson B. The influence of pacing strategy on VO2 and supramaximal kayak performance. *Med Sci Sports Exerc* 34: 1041–1047, 2002.
8. Borg G. Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand J Rehabil Med* 2: 92–98, 1970.
9. Burtscher M, Raschner C, Zallinger G, Schwameder H, Müller E. Comparison of cardiorespiratory and metabolic responses during conventional and carving skiing. In: *Science and Skiing* 2. Müller E, ed. Meyer & Meyer Sport, 2000, pp. 54–55.
10. Cunha FA, Farinatti PTV, Midgley AW. Methodological and practical application issues in exercise prescription using the heart rate reserve and oxygen uptake reserve methods. *J Sci Med Sport* 14: 46–57, 2011.

Copyright © 2019 National Strength and Conditioning Association. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

11. di Prampero PE. Energetics of muscular exercise. *Rev Physiol Biochem Pharmacol* 89: 143–222, 1981.
12. Foster C, Hendrickson KJ, Peyer K, et al. Pattern of developing the performance template. *Br J Sports Med* 43: 765–769, 2009.
13. Gastin PB. Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sports Med* 31: 725–741, 2001.
14. Gilgien M, Crivelli P, Spörri J, Kröll J, Müller E. Characterization of course and terrain and their effect on skier speed in World Cup alpine ski racing. *PLoS One* 10: e0118119, 2015.
15. Grenier JG, Hintzy F, Antichan F, Coulmy N. Energy expenditure and respective implications of the lactic and aerobic sources over a giant slalom in young ski racers. *Sci Sports* 28: 29–35, 2012.
16. Hanon C, Lepretre PM, Bishop D, Thomas C. Oxygen uptake and blood metabolic responses to a 400-m run. *Eur J Appl Physiol* 109: 233–240, 2010.
17. Heil D, Wilcox A, Quinn C. Cardiorespiratory responses to seat tube variation during steady state cycling. *Med Sci Sports Exerc* 27: 730–735, 1995.
18. Hintermeister RA, Hagerman GR. Physiology of alpine skiing. In: *Exercise and Sport Science* (Vol. 44). Garrett WE Jr and Kirkendall DT, eds. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins, 2000. pp. 695–707.
19. Hogan MC, Richardson RS, Kurdak SS. Initial fall in skeletal muscle force development during ischemia is related to oxygen availability. *J Appl Physiol* 77: 2380–2384, 1994.
20. Howald H, Von Glutz G, Billeter R. Energy stores and substrate utilization in muscle during exercise. In: *The Third International Symposium on Biochemistry of Exercise*. Landry F and Orban WAR, eds. Miami, FL: Miami Symposia Specialists, 1978. pp. 75–86.
21. Johnston RB, Howard ME, Cawley PW, Losse GM. Effect of lower extremity muscular fatigue on motor control performance. *Med Sci Sports Exerc* 30: 1703–1707, 1998.
22. Karlsson J, et al. *The physiologie of alpine skiing [trad.]*. Michael W, ed. Park City, UT: US Ski Coaches Association, 1978. pp. 30–41. Published in Swedish by Trygg-Hansa Insurance Co. Stockholm, Sweden 90.
23. Kindermann W, Simon G, Keul J. The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training. *Eur J Appl Physiol* 42: 25–34, 1979.
24. Lamarra NB, Whipp BJ, Ward SA, Wasserman K. Effect of interbreath fluctuations on characterizing exercise gas exchange kinetics. *J Appl Physiol* 62: 2003–2012, 1987.
25. Maffiuletti NA, Impellizzeri F, Rampinini E, Bizzini M, Mognoni P. Letter to the editors - is aerobic power really critical for success in alpine skiing? *Int J Sports Med* 27: 166–167, 2006.
26. Mueller E, Schiefermuller C, Kroel J, Raschner C, Schwameder H. Skiing with carving skis—what is new ? In: *3rd International congress on skiing and science*. Bacharach D and Seifert J, eds. *Aspen, CO*: St Cloud State University, 2004. pp. 1–2.
27. Neumayr G, Hoertnagl H, Pfister R, et al. Physical and physiological factors associated with success in professional alpine skiing. *Int J Sports Med* 24: 571–575, 2003.
28. Noakes TD, St Clair Gibson A, Lambert EV. From catastrophe to complexity: A novel model of integrative central neural regulation of effort and fatigue during exercise in humans. *Br J Sports Med* 38: 511–514, 2004.
29. Osgnach C, di Prampero P. Metabolic power in team sports—Part 2: Aerobic and anaerobic energy yields. *Int J Sports Med* 39: 588–595, 2018.
30. Patterson C, Raschner C, Platzer HP. The 2.5-minute loaded repeated jump test: Evaluating anaerobic capacity in alpine ski racers with loaded countermovement jumps. *J Strength Cond Res* 28: 2611–2620, 2014.
31. Perrey H. Prolonged kinetics of oxygen uptake during recovery from eccentric versus concentric cycle exercise. *Sci Mot* 48: 83–97, 2003.
32. Polat M. An examination of respiratory and metabolic demands of alpine skiing. *J Exerc Sci Fitness* 14: 76e81, 2016.
33. Robergs RA, Costill DL, Fink WJ, et al. Effects of warm-up on blood gases, lactate and acid-base status during sprint swimming. *Int J Sports Med* 11: 273–278, 1990.
34. Saibene F, Cortili G, Gavazzi P, Magistri P. Energy sources in alpine skiing (giant slalom). *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 53: 312–316, 1985.
35. Spörri J, Kröll J, Fasel B, Aminian K, Müller E. Course setting as a prevention measure for overuse injuries of the back in alpine ski racing. *Orthop J Sports Med* 4: 1–8, 2016.
36. Tesch PA, Larsson L, Eriksson A, Karlsson J. Muscle glycogen depletion and lactate concentration during downhill skiing. *Med Sci Sports* 10: 85–90, 1978.
37. Tesch PA. Aspects on muscle properties and use in competitive Alpine skiing. *Med Sci Sports Exerc* 27: 310–314, 1995.
38. Tucker R, Noakes TD. The physiological regulation of pacing strategy during exercise: A critical review. *Br J Sports Med* 43: e1, 2009.
39. Veicsteinas A, Ferretti G, Margonato V, Rosa G, Tagliabue D. Energy cost of and energy sources for alpine skiing in top athletes. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 56: 1187–1190, 1984.
40. Wehrlin JP, Hallen J. Linear decrease in VO_2max and performance with increasing altitude in endurance atheltes. *Eur J Appl Physiol* 96: 404–412, 2006.
41. Wittekind A, Cooper CE, Elwell CE, Leung TS, Beneke R. Warm-up effects on muscle oxygenation, metabolism and sprint cycling performance. *Eur J Applied Physiol* 112: 3129–3139, 2012.
42. Xu F, Rhodes EC. Oxygen uptake kinetics during exercise. *Sports Med* 27: 313–327, 1999.
43. Zamparo P, Tomadini S, Didonè F, et al. Bioenergetics of a slalom kayak (k1) competition. *Int J Sports Med* 27: 546–552, 2006.
44. Zamparo P, Capelli C, Pendergast D. Energetics of swimming: A historical perspective. *Eur J Appl Physiol* 111: 367–378, 2011.
45. Zitoun-Florentin F. *Contribution à l'analyse de la relation entre la filière aérobie et les performances sportives des skieurs alpins en filière d'accès au haut niveau de 1994 à nos jours*: Dissertation, University of Grenoble (France); 2011.

Copyright © 2019 National Strength and Conditioning Association. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

Etude 2

Journal of Strength and Conditioning Research

MOTOR SKILLS SPECIFIC TO FIELD ALPINE SKI RACING PHYSIOLOGICAL DEMANDS

--Manuscript Draft--

Manuscript Number:	
Full Title:	MOTOR SKILLS SPECIFIC TO FIELD ALPINE SKI RACING PHYSIOLOGICAL DEMANDS
Short Title:	
Article Type:	Original Research
Keywords:	Specific training; Specific motor skills; Alpine ski racing; Oxygen uptake; Blood lactate.
Corresponding Author:	Valentin Bottollier, M.D. (PhD Student) Universite de Rennes 2 Unite de formation et de recherche Activites physiques et sportives BRUZ, FRANCE
Corresponding Author Secondary Information:	
Corresponding Author's Institution:	Universite de Rennes 2 Unite de formation et de recherche Activites physiques et sportives
Corresponding Author's Secondary Institution:	
First Author:	Valentin Bottollier, M.D. (PhD Student)
First Author Secondary Information:	
Order of Authors:	Valentin Bottollier, M.D. (PhD Student)
	Nicolas Coulmy
	Matt R Cross
	Loïc Le Quellec
	Jacques Prioux
Order of Authors Secondary Information:	
Manuscript Region of Origin:	FRANCE
Abstract:	Background The purpose of the study was to clarify motor skills energetically specific to alpine ski racing. We compared the energy demands of field alpine ski racing (slalom (SL) and giant slalom (GS)) to a collection of effort and duration matched motor skills performance (cycling, running, trampoline bouncing, sliding and box bouncing) in highly trained alpine ski racers. Methods Eight athletes (age: 18.2 ± 0.8 years; stature: 1.72 ± 0.10 m; body mass: 65.8 ± 12.0 kg) performed an incremental test on cycle ergometer, two field standardized alpine ski runs: (1xSL and 1xGS) and five physical tests using five different motor skills. Oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) and heart rate were recorded continuously. Blood lactate was determined immediately pre-run, and 3 and 5 minutes post-run. The contribution of aerobic, glycolytic and phosphagen energy systems was estimated. Results No significant difference in aerobic and glycolytic energy system contribution, total

Powered by Editorial Manager® and ProduXion Manager® from Aries Systems Corporation

	energy output, glycolytic energy output, aerobic energy output, phosphagen energy output, [La]peak, Δ[La] were observed between sliding and both GS and SL. Conclusions Thus, sliding may be more specific to GS and SL than the others motor skills tested regarding physiological parameters.
Suggested Reviewers:	Grégoire Millet gregoire.millet@unil.ch
	Micah Gross micah.gross@baspo.admin.ch
Opposed Reviewers:	

Powered by Editorial Manager® and ProduXion Manager® from Aries Systems Corporation

Introduction

On-snow alpine ski training is of utmost importance for the development technique, and physical capacities. Unfortunately, since athletes are required to return to the beginning of the slope, the effective time of skiing per training session is particularly short. Furthermore, on-mountain training sessions are tenuous for climatic, organizational and financial reasons. Consequently, alpine ski (AS) athletes would benefit from using off-snow training using race specific stimuli (27,34) in the aim of maximizing their practice and enhancing race specific skills and physiological profiles.

Studies investigating specific motor skills (SMS) to AS racing are rare. Gross et al.(15) showed that the aerobic metabolism plays a key role in total energy expenditure (63.3 ± 2.8%) during a 90s Box test on high-level AS racers. Similar aerobic energy system contributions (60 to 70%) observed between the Box test and 72 to 76s of giant slalom (GS) (10,14) may highlight specificity to AS racing physiological demands. Running and cycling are mostly used by AS racers during energetic tests, and strength and conditioning sessions (20), which would suggest some level of physiologically specificity to AS racing. However, 49 to 60s running (18,40) and cycling (12) show higher glycolytic system implication when compared to GS (25.3-41% vs 40-63%) (10,14). In AS racing field studies, 90s Box bouncing, running and cycling data are comprised of different subjects, effort durations and pacing strategies. Thus, it is difficult to conclude about the specificity of 90s Box bouncing and specificity of running and cycling to GS physiological requirements.

More specific methods have been proposed for AC conditioning and testing. Namely, such tests involve some degree of unilateral motion, to mimic the turning characteristics of ski racing. One such method is 'sliding' back and forth on a short low-friction platform flanked with ramped sections to push off (maximally, or otherwise). Another is using a trampoline to mimic ski-specific actions. Both sliding and lateral bouncing on a trampoline are relatively common in strength and conditioning. Baum et al. (3) show that biomechanical sliding characteristics are specific to AS racing. Likewise, these authors also show that change of direction time and knee angle during sliding are similar with slalom (SL) and GS (5,33). However, to the best of our knowledge, no studies have investigated the physiological demands of such activities to qualify their specificity.

Moreover, it would be also interesting to compare these scarce previous data to SL physiological requirements. Indeed, the SL metabolic demands may be different from GS due to the duration of work and disparate biomechanical constraints (5,32). However, SL physiological requirements have not been yet clarified. Finally, most previous studies investigating potentially valuable SMS have only compared laboratory tests results with AS

racer levels (9,23,24,29,35,39). Lab-tests on AS racers may not provide accurate information to conclude about SMS of AS racing energy demands. The physiological specificity of a test can only be assessed by comparing variables between field AS racing and prospective SMS.

Improving knowledge of AS racing SMS would enable the development and use of specific methods to target aerobic, glycolytic and phosphagen system capacity during training, improve the specificity of strength and conditioning practices, and help to establish the validity of a sport specific test. Consequently, the purpose of this study was to compare the physiological demands (oxygen consumption ($\dot{V}O_2$), blood lactate concentration ([La]) and heart rate (HR)) and estimated contributions of energy metabolisms (aerobic, glycolytic and phosphagen systems) between field AS racing (SL and GS) and different motor skills (sliding, trampoline bouncing, box bouncing, running and cycling) during matched effort duration in highly trained AS racers. We hypothesized that box bouncing, sliding and trampoline bouncing would be specific to SL and GS physiological demands contrary to running and cycling.

Materials and methods

Subjects

Eight highly trained AS racers (male 4, female 4, 18.2 ± 0.8 years, height 1.72 ± 0.10 m, and body mass 65.8 ± 12.0 kg) volunteered for the study. They trained on-hill at least 5 days a week for alpine skiing during the winter season. Subjects were competitive at an international level races with an average performance of 66.4 ± 11.7 International Ski Federation (FIS) points. Before the tests, all athletes were informed of the procedures, including the possible risks involved, and signed a consent form. The study conformed to the recommendations of the Declaration of Helsinki and was approved by a local ethics committee.

Experimental approach to the problem

Subjects performed two race-pace AS runs, each separated by at least 24h rest, over an 8-day period during the winter competitive season: one GS and one SL of about 53s in randomized order. Each run was preceded by a competition style self-conducted warm-up, after which a portable gas exchange system and HR monitor were attached to the subject's chest. All the tests were performed with International Ski Federation (FIS) approved and well-prepared skis on the same slope, which is likewise approved for international competitions in SL and GS. Subjects were instructed to abstain from strenuous activities and alcohol for at least 24 hours before testing. Meals took place at the same place and hour before each test. Three to five days after the field test, subjects performed a lab-based maximal graded test on cycle ergometer to

determine maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2max}$). Two days after the incremental test, subjects performed five all-out 53s tests (sliding, trampoline bouncing, box bouncing, running and cycling) of five different motor skills in a randomized order. The same physiological measurements were performed in both motor skills and AS tests. All participants were accustomed with testing procedures and were familiarised with the measurement apparatus pre-assessment.

Alpine ski racing tests design

Each testing morning (8 a.m.), experts (previous national coaches) prepared gates on a groomed slope using a measuring tape. Number of gates, number of turns and slope length were chosen to simulate actual international competition conditions aligning with FIS rules. Lengths between gates were set to 11 m in SL and 25 m in GS. Institution rules don't set lateral length between gates. To reproduce competition conditions, lateral lengths between gates were standardized and adjusted regarding the steepness of each slope section according to average racing difficulty. Gates were set according to FIS rules: number of direction changes (by rounding up or down of the decimals) 11 to 15% and 30-35 ± 3% of the vertical drop in meters, respectively for GS and SL.

Environmental conditions

The two AS racing and five motor skills testing sessions were conducted within a two-hour block in a six-hour window (between 9 a.m. to 3 p.m.) to minimize diurnal variation (11). All AS racing tests were conducted under similar environmental conditions (luminosity, sunny ; air temperature, -4 to 1°C ; snow temperature, -5 to 0°C ; wind, 0 to 12 $km.h^{-1}$). The outdoor running test was conducted in fine conditions with less than 15 $km.h^{-1}$ of wind.

Maximal graded tests

$\dot{V}O_{2max}$ was determined using a continuous maximal graded test conducted on lab-based cycle ergometer (Erg 550, Bosch, Germany). Starting resistance was set at 80W, and was increased by 25W every minute until volitional exhaustion (16). Subjects were continuously monitored and provided with strong verbal encouragement to persist and to keep pace 80 rotations per minute (rpm) throughout the experiment. Maximal aerobic power (MAP) was recorded. $\dot{V}O_2$ and HR were recorded continuously, and a blood sample was taken 3min post-test (1). The $\dot{V}O_{2max}$ corresponded to the highest $\dot{V}O_2$ attained in two successive 15s periods for the maximal

graded test. Individual $\dot{V}O_{2max}$ was considered attained when three or more of the following criteria were observed : 1) a steady state of $\dot{V}O_2$ despite increasing power (change in $\dot{V}O_2$ at $\dot{V}O_{2max} \leq 150$ mL.min^{-1}); 2) a final respiratory exchange ratio higher than 1.1; 3) visible subject exhaustion, and 4) a HR at the end of exercise within 10 beats per minute (bpm) of the predicted maximum [210 - (0.65 x age)].

Five motor skills tested:

The five all-out 53s tests involved sliding, trampoline bouncing, box bouncing, running and cycling. Experimenters generated an audible signal for the start, 10s before the end, and at the end of exercise. The sliding test was performed on an 8-foot Perspex sliding platform (Ultraslide, Northbrook, US) wearing specifically designed socks (Ultraslide, Northbrook, US) over personal running shoes. The friction of slide platform was reduced as much as possible by applying a coating of silicon lubricant between each trial. Trampoline bouncing was performed on both sides of 80 cm space set at the middle of olympic trampoline (Gymnova, Marseille, France). Box bouncing consisted in bouncing on both box sides touching the top of the box. The box was 40 cm high, 51 cm wide and 60 cm long (15,23). The running test was performed on an outdoor 350m running track. Finally, the cycling test was performed indoors on a stationary ergometer (Wattbike, Colombes, France). Instructions were to achieve the best push-off number, to achieve the best mean frequency of bounces, to run the best mean velocity and to perform the best mean power respectively for sliding test, trampoline bouncing test, box bouncing test, running test and the cycling test.

Respiratory gas exchange and heart rate measurements

$\dot{V}O_2$ and carbon dioxide output ($\dot{V}CO_2$) were recorded breath-by-breath using a portable gas exchange system (Metamax, Cortex, Germany). Before each test the oxygen (O_2) and carbon dioxide (CO_2) analysis systems were calibrated using ambient air and a gas of known O_2 and CO_2 concentrations (16% and 5%, respectively). The calibration of the metamax turbine flow-meter was performed using a 3000 mL syringe (Cortex, Germany). Start HR (HR_{start}), HR mean (HR_{mean}) and HR peak (HR_{peak}) were measured and recorded with a HR monitor (V800 and H7, Polar, Kempele, Finland) for each skier. As suggested by Lamarra et al. (22), breath-by-breath values, that were 3 standard deviation (SD) from the local mean, were removed from the analysis. Gas exchange values were filtered using a 5s central moving average to obtain $\dot{V}O_{2max}$ and peak $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_{2peak}$). $\dot{V}O_2$ was also averaged every 5s ($\dot{V}O_{2average}$). $\dot{V}O_{2peak}$ was expressed in percentage of $\dot{V}O_{2max}$. Altitude differences between physical tests (479m) and the mean of

the runs were calculated. A value of 6.3%, corresponding to an altitude difference of 1000m, was applied to $\dot{V}O_{2max}$ to express relative $\dot{V}O_{2max}$ at run altitude (36).

Blood sample collection, lactate determination and perceived exertion

Blood was drawn at rest before the field test ($[La]_{pre}$) and 3 ($[La]_{3min}$) and 5 ($[La]_{5min}$) min after this test, and measured using a portable analyser (Lactate Pro 2, Arkray, Kyoto, Japan). Peak blood lactate concentration ($[La]_{peak}$) was recorded as the highest [La] obtained between the third and fifth min of recovery. Delta (Δ) [La] (Δ[La]) was calculated as difference between $[La]_{peak}$ and $[La]_{pre}$. Three min after the completion of the session, the subjects were asked to indicate their rate of perceived exertion (RPE) during the test using Borg's scale ranging 6 – 20 (7).

Video recording

Field tests were recorded using a portable video camera (Sony, DCR-SX34), from a vantage point with a clear view of the top and bottom of the run. Recordings were used to time field tests from the moment the athlete began moving in starting gate to the moment they touched the last gate, and to assess movement frequency (change of direction for SL, GS, sliding, trampoline bouncing and box bouncing ; stride frequency and pedaling for running and cycling respectively). Frame frequency was 50 Hz, and footage was de-interlaced to have a 0.02s time precision.

Energy system contribution calculation

Estimates of aerobic metabolism use were carried out through the integral $\dot{V}O_2$ applying an oxygen equivalent of 20.9 kJ.L O_2^{-1} (6). Estimates of anaerobic metabolism use were carried out through lactic and alactic components. A value of 1 mmol.L^{-1} Δ[La] is considered to be equivalent to 3 mL O_2.kg^{-1} body mass (6). Phosphagen energy system contribution (ΔEaLa) was estimated based on 416 J.kg^{-1} of body mass according to the depletion of Phosphocreatine (PCr) stores in active muscle during exhaustive exercise (37).

Total energetic output (ΔE in kJ.min^{-1}) was calculated using the following equation (6):

$$\Delta E = \Delta EaLa + \Delta E[La] + \Delta E\ O_2 \qquad \text{(Equation 1)}$$

In this way, aerobic, glycolytic and phosphagen energy systems contributions were expressed in total energetic output percentage.

Statistical analysis

Data are reported as mean ± standard deviation (SD). Based on power analysis (desired power = 0.80 and an alpha error = 0.05), we determined that a sample size of n = 8 would be sufficient to study the metabolic demands of 53s test events. Effect sizes (ES) were calculated using Cohen's d. ES values were along with 95% confidence interval and were calculated from the means and the variances (allowing the calculation of the SD) from the linear mixed effects models. ES of ≤ 0.2, 0.21-0.60, 0.61-1.20, 1.21-2.0, ≥2.0 were considered as trivial, small, moderate, large and very large (2). When a significant difference was observed, the percentage of difference between the two values were presented with 95% confidence interval. Between and within comparisons across tests of relative aerobic and anaerobic lactic contributions, start oxygen uptake ($\dot{V}O_{2start}$), $\dot{V}O_{2peak}$, HR_{mean}, HR_{peak}, $[La]_{peak}$, Δ[La], RPE were performed using a two-way analysis of variance (XLStat 2017, Paris, France). Honest significant difference (HSD), Tukey and Student–Newman–Keuls post hoc tests were used in the case of significant main effect and interactions, respectively. The level of significance was set at $p < 0.05$.

Results

Maximal graded test

$\dot{V}O_{2max}$, HR_{max} and MAP were respectively equal to 57.9 ± 6.7 $mL.min^{-1}.kg^{-1}$, 197 ± 4 bpm and 290.6 ± 68.3 W.

Energy output contribution

There was no significant difference (i) in aerobic system contribution between SL or GS and sliding, box bouncing or running (Figure 1), (ii) in glycolytic system contribution between SL or GS and sliding or trampoline bouncing and (iii) in phosphagen energy system contribution between SL and sliding or trampoline bouncing. There was a significant difference in phosphagen system contribution between GS and sliding ($p < 0.01$; + 15.1%; d = 1.3; ES: large) or trampoline bouncing ($p < 0.01$; + 20.6%; d = 1.5; ES: large).

*** FIGURE 1 HERE ***

Energy output

There was no significant difference observed in total energy output between SL or GS and sliding (Figure 2). Total energy outputs in running ($p < 0.01$; + 25.8%; d = 1.1; ES: moderate) and cycling ($p < 0.05$; + 33.2%; d = 1.1; ES: moderate) were higher than in SL. Total energy outputs in trampoline bouncing ($p < 0.05$; + 22.2%; d = 0.9; ES: moderate), box bouncing (p <

0.01; + 20.7%; d = 1.6; ES: large), running ($p < 0.001$; + 38.6%; d = 1.2; ES: moderate) and cycling ($p < 0.01$; + 55.4%; d = 1.4; ES: large) were higher than in GS.

Furthermore, no significant differences were observed in glycolytic energy output between SL or GS and trampoline bouncing and sliding (Figure 2). Glycolytic energy output in box bouncing ($p < 0.05$; + 28.7%; d = 1.0; ES: moderate), running ($p < 0.01$; + 38.6%; d = 1.2; ES: large) and cycling ($p < 0.01$; + 70.2%; d = 1.4; ES: large) were significantly higher than in SL. Glycolytic energy output in box bouncing ($p < 0.01$; + 93.1%; d = 1.5; ES: large), running ($p < 0.001$; + 108.0%; d = 1.6; ES: large) and cycling ($p < 0.001$; + 155.5%; d = 1.6; ES: large) were significantly higher than in GS.

Finally, there was no significant difference in aerobic energy output between SL or GS and sliding (Figure 2). Aerobic energy output was observed to be higher in running ($p < 0.05$; + 32.1%; d = 0.9; ES: moderate) than in SL. Aerobic energy outputs were also observed to be higher in trampoline bouncing ($p < 0.05$; + 34.7%; d = 1.0; ES: moderate), box bouncing ($p < 0.05$; + 31.6%; d = 0.9; ES: moderate), running ($p < 0.05$; + 41.2%; d = 1.1; ES: moderate) and cycling ($p < 0.05$; + 32.3%; d = 1.0; ES: moderate) than in GS.

*** FIGURE 2 HERE ***

Oxygen uptake

$\dot{V}O_{2peak}$ (Table 1) were significantly higher in sliding ($p < 0.01$; + 117.4%; d = 1.5; ES: large), trampoline bouncing ($p < 0.001$; + 124.6%; d = 1.7; ES: large), box bouncing ($p < 0.001$; + 125.9%; d = 1.8; ES: large), running ($p < 0.001$; + 122.0%; d = 1.6; ES: large) and cycling ($p < 0.001$; + 119.2%; d = 1.5; ES: large) than in SL. $\dot{V}O_{2peak}$ (Table 1) were significantly higher in sliding ($p < 0.01$; + 129.5%; d = 1.5; ES: large), trampoline bouncing ($p < 0.001$; + 137.4%; d = 1.6; ES: large), box bouncing ($p < 0.001$; + 138.9%; d = 1.7; ES: large), running ($p < 0.001$; + 134.6%; d = 1.6; ES: large) and cycling ($p < 0.001$; + 131.5%; d = 1.5; ES: large) than in GS.

*** FIGURE 3 HERE ***

*** TABLE 1 HERE ***

Blood lactate concentration

Figure 4 shows that $[La]_{peak}$ was significantly higher ($p < 0.05$; + 38.5%; d = 1.2; ES: moderate) in SL than in GS. No significant differences of $[La]_{peak}$ (Figure 4) and Δ[La] (Table 1) was observed between sliding, trampoline bouncing and SL and GS. $[La]_{peak}$ in box bouncing ($p < 0.01$; + 132.9%; d = 1.4; ES: large), running ($p < 0.01$; + 141.1%; d = 1.2; ES: large) and cycling ($p < 0.001$; + 159.1%; d = 1.6; ES: large) were significantly higher than in SL. $[La]_{peak}$ in box bouncing ($p < 0.001$; + 184.1%; d = 1.8; ES: large), running ($p < 0.001$; + 195.5%; d = 1.5; ES: large) and cycling ($p < 0.001$; + 220.4%; d = 1.8; ES: large) were significantly higher than in GS ($p < 0.001$).

*** FIGURE 4 HERE ***

Rate of perceived exertion

RPE was significantly higher ($p < 0.01$; + 15.0%; d = 1.3; ES: large) in SL than in GS (Figure 5). There were no significant differences in RPE between sliding, trampoline bouncing and GS and between box bouncing, running and SL. RPE in sliding ($p < 0.001$; - 11.8%; d = 1.1; ES: moderate) and trampoline bouncing ($p < 0.05$; - 21.2%; d = 1.4; ES: large) were significantly lower than in SL. RPE in box bouncing ($p < 0.001$; + 20.6%; d = 1.5; ES: large), running ($p < 0.001$; + 16.8%; d = 1.6; ES: large) and cycling ($p < 0.001$; + 30.8%; d = 1.8; ES: large) were significantly higher than in GS.

*** FIGURE 5 HERE ***

Frequency

Mean turn frequencies were 1.10 ± 0.06s and 1.72 ± 0.03s, respectively in SL and GS. Mean push-offs frequency was 0.96 ± 0.17s in sliding which was not different from SL turn frequency. Mean bouncing frequencies were 0.87 ± 0.13s and 0.75 ± 0.08s in trampoline bouncing and box bouncing, respectively. Mean stride frequency in running was 0.29 ± 0.02s. Mean pedalling frequency in cycling was 0.26 ± 0.01s.

Discussion

To our knowledge, this study is the first in contemporary AS racing to show that according to our hypothesis while trampoline and box bouncing share physiological similarity with GS and SL, sliding might provide a clear and similar alternative for training and testing in AS racing

technical disciplines. No clear differences in aerobic and glycolytic system contribution, total energy output, glycolytic energy output, aerobic energy output, phosphagen energy output, $[La]_{peak}$, $\Delta[La]$ were observed between the results from sliding and both disciplines. $\dot{V}O_{2peak}$ is significantly higher in sliding than in GS and SL but remains lower than the four other motor skills. We did not observe any significant difference in RPE between sliding and GS. RPE is higher in SL than in sliding. However, RPE in sliding is the only variable that varies significantly between GS or SL.

Biomechanical specificity may explain the lack of clear difference between the sliding test and the ski disciplines (3): (i) as AS ski racing, the major ground reaction forces are lateral (vs frontal in running and cycling), (ii) quadriceps contraction types are eccentric and then concentric (vs concentric in cycling), (iii) load is higher than the body mass (vs lower than body mass in cycling) and (iv) the ratio between maximal loaded and less loaded time for one leg is 1-1 (vs 1-3 in running). The switching time during sliding is similar to SL and GS turn timing (0.8s and 1.4-1.7s, respectively) (5,21), and is congruent with that previously reported in the literature (3) (0.96 ± 0.17s vs. 0.8 to 1.2s, respectively). Finally, Baum et al. (3) show that minimal knee angle in both sliding and technical disciplines is similar (sliding is about 110-130° vs. 107-122°, respectively) (21,33). To support the specificity of a given test, Sheppard et al. (31) suggest that it must include not only physiological and biomechanical characteristics but also perceptive-decisional factors. In ice hockey, a physical test including dynamic balance motor skills is more correlated to skating performance (17). As in AS racing, athletes, during sliding, must deal with the perception of lateral and frontal imbalances to create a centripetal force adapted to the environment. In sliding, imbalance is created by voluntary impulses in the same manner as AS racing. This means that when fatigue occurs, the athlete has the choice to push softer - being less efficient - by creating less imbalance in a way to not unnecessarily increase the chances of falling. This mostly unconscious perceptive-decisional process underlies intensity, which in turn directly influences physiological requirements (25). Dynamic balance is at the heart of AS racing, and it follows that motor skills lacking this factor would lack specificity.

Per our hypothesis, running and cycling on an ergometer do not seem GS and SL physiologically SMS. Indeed, total and glycolytic energy outputs, $[La]_{peak}$ and $\Delta[La]$ in running and cycling were found to be respectively significantly higher than those in SL and GS. Aerobic, glycolytic and phosphagen energy system contribution in cycling and glycolytic and phosphagen energy system contribution in running were significantly different than in GS. Phosphagen and glycolytic energy contribution in cycling and phosphagen energy contribution

in running were respectively different than in SL. Nevertheless, running and cycling are common in both AS conditioning and profiling (20), which contrasts the clear difference in physiological load highlighted in our results. Indeed, using these motor skills during AS racing physical testing assesses physiological qualities, which are not exactly those needed and required during field AS racing. Despite this, running and cycling remain accessible training modalities that are helpful in setting accurate training load and developing physiological qualities. Indeed, athletes can develop very high effort intensity without being disturbed by perceptive-decisional matters inherent in skiing, and consequently can be implemented during stages of general preparation. However, neglecting specific preparation may weaken the transfer of physical enhancement into specific performance (8). As such, preparation must involve SMS and specific characteristics of competition improving energetic, neuro-muscular and psychological qualities; which in turn will enhance performance (38). Hence, it would be an error to avoid coaching SMS during the last part of the preparation, using only cycling and running for AS racers.

Over the last decades, authors have developed a range of AS racing specific devices in the effort of replicating ski racing biomechanical characteristics. These devices include successively muscular load and lower-limb kinematic parameters (27), vibration stress (26) and lateral load (26,28). These devices allow very specific biomechanical alpine ski racing characteristics. However, perceptive-decisional factors are totally excluded from these devices, which substantially decreases specificity of assessment. Besides physiological, biomechanical and perceptive-decisional motor skills specificity, a major point is the accessibility, usability and practicability of the assessment method (4). To be valuable to strength and conditioning practitioners, a device must be transportable, easy and quick to establish, safe, and inexpensive (4). Sliding is characterized by all these criteria. For testing cases, SMS have also to have accurate observable and quick feedback. Using video camera, only 2-3 minutes are needed to assess total push-off number and every 10s push-offs number average post sliding test of about 60-80s.

The selection of motor skills selected and tested in this study came from (i) the scarce literature knowledge on AS racing specific tests, (ii) field knowledge and (iii) motor skills usability in the field. This study attempted to strengthen knowledge surrounding specific assessment modalities for AS racing, while considering all potential motor skills are not investigated here. A limitation of sliding motor skills would be the regularity and stability of the proposed environment, which may permit the creation of reliable tests and accurate training loads but that is characteristically different to practical performance measures (30). Indeed, AS racing is

the opposite of regularity and stability, considering the inherent irregularity of snow quality, gates and horizontal and vertical lengths between gates, slope steepness and orientation and finally visibility (30). Furthermore, strategic parameters like trajectory precision are also excluded in sliding which is essential for reliability during physical testing but which results in another step away from the specific activity.

In conclusion, this study has shown that sliding elicits physiological loads not dissimilar to that observed in GS and SL, in contrast to more commonly used methods of training/testing. This possible similarity highlights sliding might be a relevant technical AS racing SMS tool that can be easily implemented into the field. Trampoline bouncing and box bouncing may also offer a possible alternative where necessary or different aims of assessment are warranted, however a clear lack of physiological similarity in running and cycling highlights the limitations of these methods. Further studies should aim to further clarify the similarity of the method to ski racing parameters, and demonstrate the reliability of the test on a set duration (19).

Practical applications

Using sliding as specific AS racing motor skills during strength and conditioning may aid in targeting the development of capacities intrinsic to AS racing. Trampoline and box bouncing also offer a physiologically similar stimuli. On the other hand, contrary to running and cycling, sliding may be considered a specific physical profiling and training tool for AS racing. After reproducibility validation study, an AS racing specific test will permit (i) to objectify physiological specific effect of scheduled training, (ii) to longitudinally assess athlete physiological status to try to avoid non-functional overreaching, (iii) to set post injury requirements to go back on specific exercises, and (iv) to set physiological requirements during talent detection process. During strength and conditioning and potentially during physical testing, sliding would be an interesting motor skill to use for AS racing coaches. It has the potential to both improve performance and reduce injury risks enabling a more accurate training load scheduling.

Acknowledgments:

The authors are grateful to athletes for their kind cooperation in the study and coaches for their technical assistance.

Conflict of interest:

The authors have no conflicts of interest to declare.

Ethical standards:

The experiments comply with the current laws of the country in which they were performed.

References

1. Bangsbo J, Graham T, Johansen L, Saltin B. Muscle lactate metabolism in recovery from intense exhaustive exercise: impact of light exercise. J Appl Physiol 1994;77:1890-1995.
2. Batterham AM, Hopkins WG. Making meaningful inferences about magnitudes. International journal of sports physiology and performance 1(1): 50-57, 2006.
3. Baum K, Hoy S, Leyk D, Essfeld D. An incremental exercise test simulating the muscular activity of slalom. in Müller et al. Sciences of skiing 1997;1:479- 486.
4. Baumgartner TA, Jackson AS. Measurement for Evaluation in Physical Education and Exercise Science (3rd ed.), Wm. C.Brown Publishers. Dubuque IA 1987.
5. Berg HE, Eiken O. Muscle control in elite alpine skiing. Med Sci Sports Exerc 1999; 31:1065-1067.
6. Bertuzzi, R, Melegati, J, Bueno, S, Ghiarone, T, Pasqua LA, Fernandes Gaspari, A, Lima-Silva AE, Goldman A. GEDAE-LaB: a free software to calculate the energy system contributions during exercise, PLoS ONE 11(1):e0145733, 2016.
7. Borg G. Perceived exertion as an indicator of somatic stress. Scand J Rehabil Med 1970;2:92-98.
8. Bosco C. Physiologische Betrachtungen zum Explosivkrafttraining unter Hyperschwerkraftbedingungen. Leistungssport 1985;15,19–24.
9. Bosco C. Evaluation and planning of conditioning training for alpine skiers. In Müller et al. Sciences and skiing 1996;1:229-250.
10. Burtscher M, Raschner C, Zallinger G, Schwameder H, Müller E. Comparison of cardiorespiratory and metabolic responses during conventional and carving skiing. In Müller et al. Science and skiing 2000;2:54-55.

11. Carter H, Pringle JS, Jones AM, Doust JH. Oxygen uptake kinetics during treadmill running across exercise intensity domains. Eur J Appl Physiol 2002;4:347-354.
12. Craig NP, Norton KI. Characteristics of Track Cycling. Sports Med 2001;31(7):457-468.
13. Duffield R, Dawson B, Goodman C. Energy system contribution to 100-m and 200-m track running events. J Sci med Sport 2004;7(3):302-13.
14. Grenier JG, Hintzy F, Antichan F, Coulmy N. Energy expenditure and respective implications of the lactic and aerobic sources over a giant slalom in young ski racers. Sciences et Sports 2012;28:29-35.
15. Gross M, Hemund K, Vogt M. High intensity training and energy production during 90-second box jump in junior alpine skiers. J Strength Cond Res 2014;28(6):1581-1587.
16. Heil D, Wilcox A, Quinn C. Cardiorespiratory responses to seat tube variation during steady state cycling. Med Sci Sports Exerc 1995;27:730-5.
17. Henriksson T, Vescovi JD, Fjellman-Wiklund A, Gilenstam K. Laboratory- and field-based testing as predictors of skating performance in competitive-level female ice hockey. Journal of Sports Medicine 2016;7.
18. Hill DW. Energy system contributions in middle-distance running events. J Sports Sci 1999;17(6):477-83.
19. Hopkins WG. Measures of reliability in sports medicine and science. Sports Med 2000;30:1-15.
20. Hydren JR, Volek JS, Maresh CM, Comstock BA, Kraemer WJ. Review of strength and conditioning for alpine ski racing. J Strength Cond Res 2013;35:10–28.
21. Kröll J, Spörri J, Fasel B, Müller E. Kinetic and kinematic comparison of alpine ski racing disciplines as a base for specific conditioning regimes. Conference Paper 2015.
22. Lamarra NB, Whipp BJ, Ward SA, Wasserman K. Effect of interbreath fluctuations on characterizing exercise gas exchange kinetics. J Appl Physiol 1987;62:2003-2012.
23. McGinnis PM, Piper FC, Dillman CJ. Skills tests for discrimination of alpine skiing ability. Journal of the United States Ski Coaches Association 1981;4:20-5.
24. Neumayr G, Hoertnagl H, Pfister R, Koller A, Eibl G, Raas E. Physical and physiological factors associated with success in professional alpine skiing. Int J Sports Med 2003;24(8):571-5.
25. Noakes TD, St Clair Gibson A, Lambert EV. From catastrophe to complexity: a novel model of integrative central neural regulation of effort and fatigue during exercise in humans. Br J Sports Med 2004;38: 511-514.

26. Pozzo R, Zancolo F, Canclini A, Baroni G. Loading conditions and neuromuscular activity during vertical knee flexion-extension and turn like movement in the new simulator under vibration conditions, in Müller et al. Science of Skiing 2009;4:410-418.
27. Raschner C, Müller E, Schwameder H. Kinematic and kinetic analysis of slalom turns as a basis for the development of specific training methods to improve strength and endurance. in Müller et al. Sciences of skiing 1997;1:251-261.
28. Raschner C, Platzer H, Patterson C, Werner I, Huber R, Hildebrandt C. The relationship between ACL injuries and physical fitness in young competitive ski racers. B J of Sports Med 2012;46(15):1065-1071.
29. Reid RC, Johnson SC, Kipp RW, Albert RW, White AT. Validity of sport-specific field tests for elite and developing alpine ski racers. In Müller et al. Science and skiing 1996;1:285-296.
30. Seifert J, Kröll J, Müller E. The relationship of heart rate and lactate to cumulative muscle fatigue during recreational alpine skiing. Journal of Strength and Conditioning Research 2009;23(3):698-704.
31. Sheppard JM, Young WB. Agility literature review: classifications, training and testing. J Sports Sci 2006;24(9): 919-932.
32. Spörri J, Kröll J, Schwameder H, Schiefermüller C, Müller E. Course setting and selected biomechanical variables related to injury risk in alpine ski racing: an explorative case study. British Journal of Sports Medicine 2012;14;46(15):1072-7.
33. Szmedra L, Joohee IM, Nioka S, Chance B, Rundell KW. Hemoglobin/ myoglobin oxygen desaturation during Alpine skiing. Medicine Science in Sports Exercise 2001;33(2):232-6.
34. Tesch PA. Aspects on muscle properties and use in competitive alpine skiing. Med Sci Sports Exerc 1995;27:310-314.
35. Vogt M, Hoppeler H. Competitive alpine skiing: combining strength and endurance training. Molecular bases and applications. In Müller et al. Science and Skiing 2012;5:38-47.
36. Wehrlin JP, Hallen J. Linear decrease in VO_{2max} and performance with increasing altitude in endurance atheltes. Eur J Appl Physiol 2006;96:404-412.
37. Zamparo P, Capelli C, Pendergast D. Energetics of swimming: a historical perspective, Eur J Appl Physiol 2011;11: 367-378.
38. Zatsiorsky VM. Strength Training-Theory and Practice (Krafttraining-Wissenschaft und Praxis). Aachen: Meyer & Meyer 1996;287.

39. Zitoun-Florentin F. Contribution à l'analyse de la relation entre la filière aérobie et les performances sportives des skieurs alpins en filière d'accès au haut niveau de 1994 à nos jours. Dissertation. University of Grenoble (France) 2011.

40. Zouhal H, Jabbour G, Jacob C, Duvigneau D, Botcazou M, Ben Abderrahaman A, Prioux J, Moussa E. Anaerobic and aerobic energy system contribution to 400-m flat and 400-m hurdles track running. J Strength Cond Res 2010;24(9):2309-2315.

Figure legends

Fig 1. Percentage contribution of the aerobic, glycolytic and phosphagen systems to the total energy output in SL, GS, sliding, trampoline bouncing, box bouncing, running and cycling.
SL: slalom ; GS: giant slalom ; Tramp bouncing: trampoline bouncing.
* : Significantly different from GS: $^{*}p < 0.05$; $^{**}p < 0.01$; $^{***}p < 0.001$.
† : Significantly different from SL: $^{\dagger}p < 0.05$; $^{\dagger\dagger}p < 0.01$; $^{\dagger\dagger\dagger}p < 0.001$.

Fig 2. Total, aerobic, glycolytic and phosphagen energy output during SL, GS, sliding, trampoline bouncing, box bouncing, running and cycling.
SL: slalom ; GS: giant slalom ; Tramp bouncing: trampoline bouncing.
* : Significantly different from GS: $^{*}p < 0.05$; $^{**}p < 0.01$; $^{***}p < 0.001$.
† : Significantly different from SL: $^{\dagger}p < 0.05$; $^{\dagger\dagger}p < 0.01$.

Fig 3. $\dot{V}O_{2average}$, expressed in percentage of $\dot{V}O_{2max}$, as a function of time (s) in SL, GS, sliding, trampoline bouncing, box bouncing, running and cycling.
$\dot{V}O_{2average}$: 5s average oxygen uptake; SL: slalom ; GS: giant slalom ; Tramp bouncing: trampoline bouncing.
* : Significantly different from both SL and GS: $^{*}p < 0.05$.

Fig 4. Peak blood lactate concentrations measured after SL, GS, sliding, trampoline bouncing, box bouncing, running and cycling.
$[La]_{peak}$: peak blood lactate concentration; SL: slalom ; GS: giant slalom ; Tramp bouncing: trampoline bouncing.
† : Significantly different from GS: $^{\dagger}p < 0.05$; $^{\dagger\dagger\dagger}p < 0.001$.
* : Significantly different from SL: $^{**}p < 0.01$; $^{***}p < 0.001$.

Fig 5. Rate of perceived exertion scores measured after SL, GS, sliding, trampoline bouncing, box bouncing, running and cycling.
RPE: rate of perceived exertion ; SL: slalom ; GS: giant slalom ; Tramp bouncing: trampoline bouncing.
† : Significantly different from GS: $^{\dagger\dagger}p < 0.01$; $^{\dagger\dagger\dagger}p < 0.001$.
* : Significantly different from SL: $^{*}p < 0.05$; $^{**}p < 0.01$; $^{***}p < 0.001$

Figure

Figures list

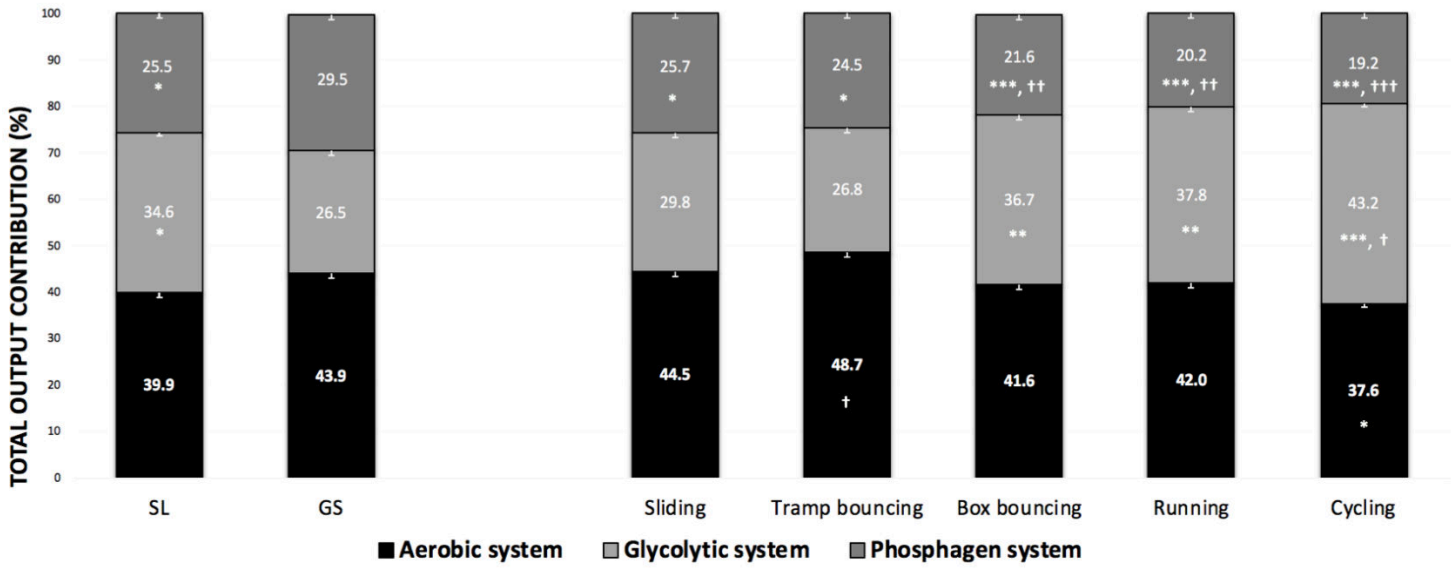
- **Fig 1.** Percentage contribution of the aerobic, glycolytic and phosphagen systems to the total energy output in SL, GS, sliding, trampoline bouncing, box bouncing, running and cycling.

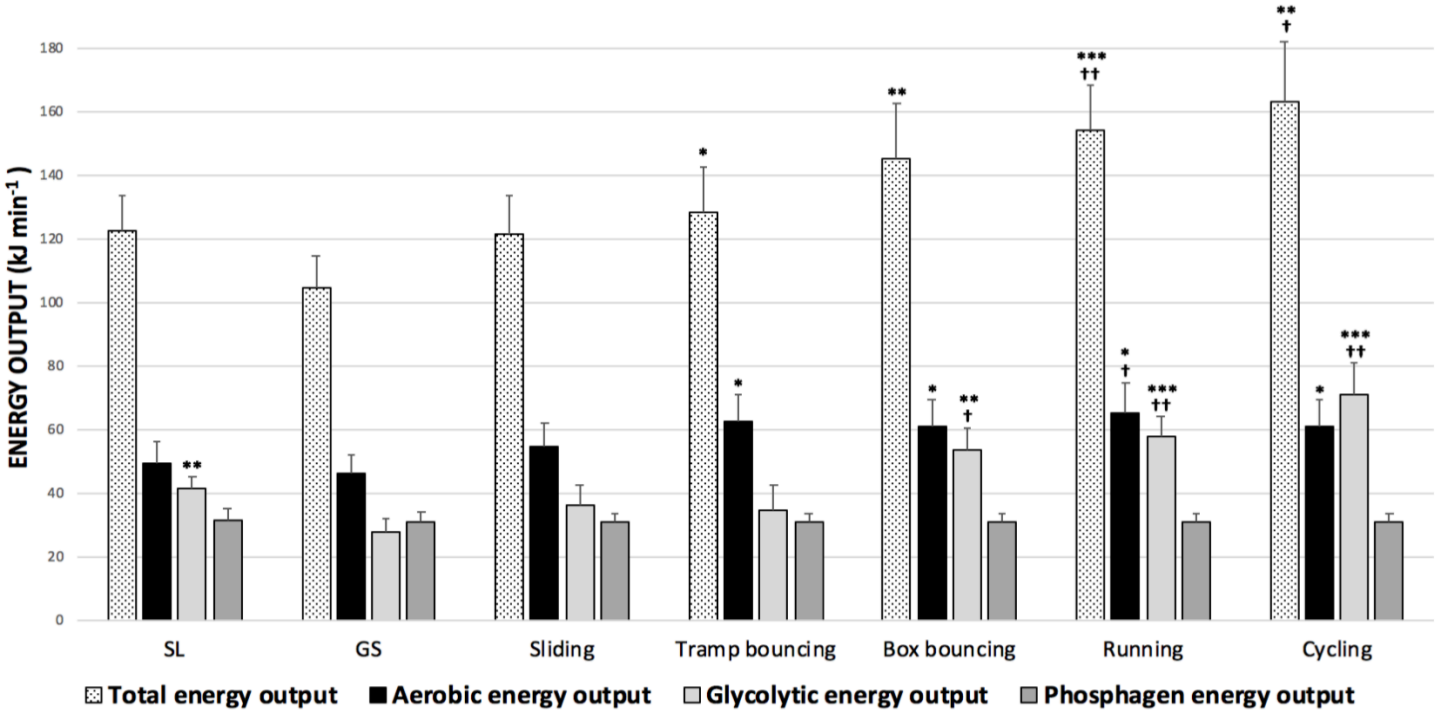
- **Fig 2.** Total, aerobic, glycolytic and phosphagen energy output during SL, GS, sliding, trampoline bouncing, box bouncing, running and cycling.

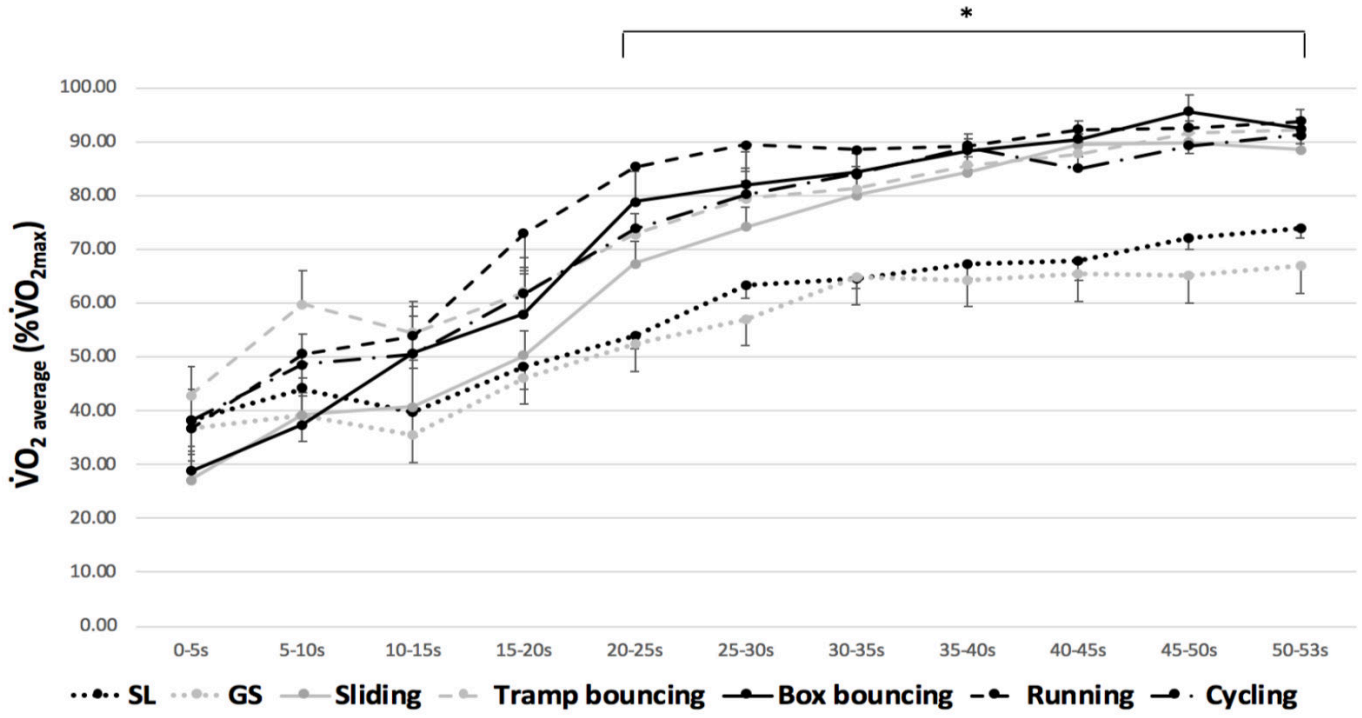
- **Fig 3.** $\dot{V}O_{2average}$, expressed in percentage of $\dot{V}O_{2max}$, as a function of time (s) in SL, GS, sliding, trampoline bouncing, box bouncing, running and cycling.

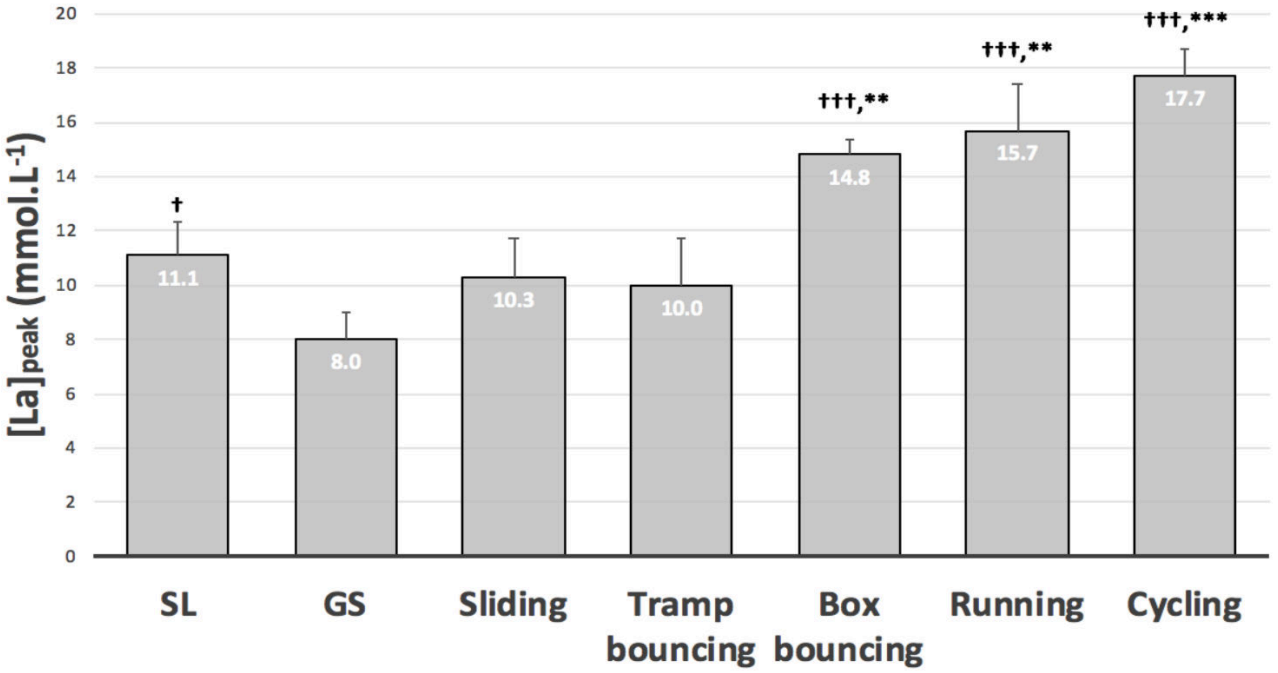
- **Fig 4.** Peak blood lactate concentrations measured after SL, GS, sliding, trampoline bouncing, box bouncing, running and cycling.

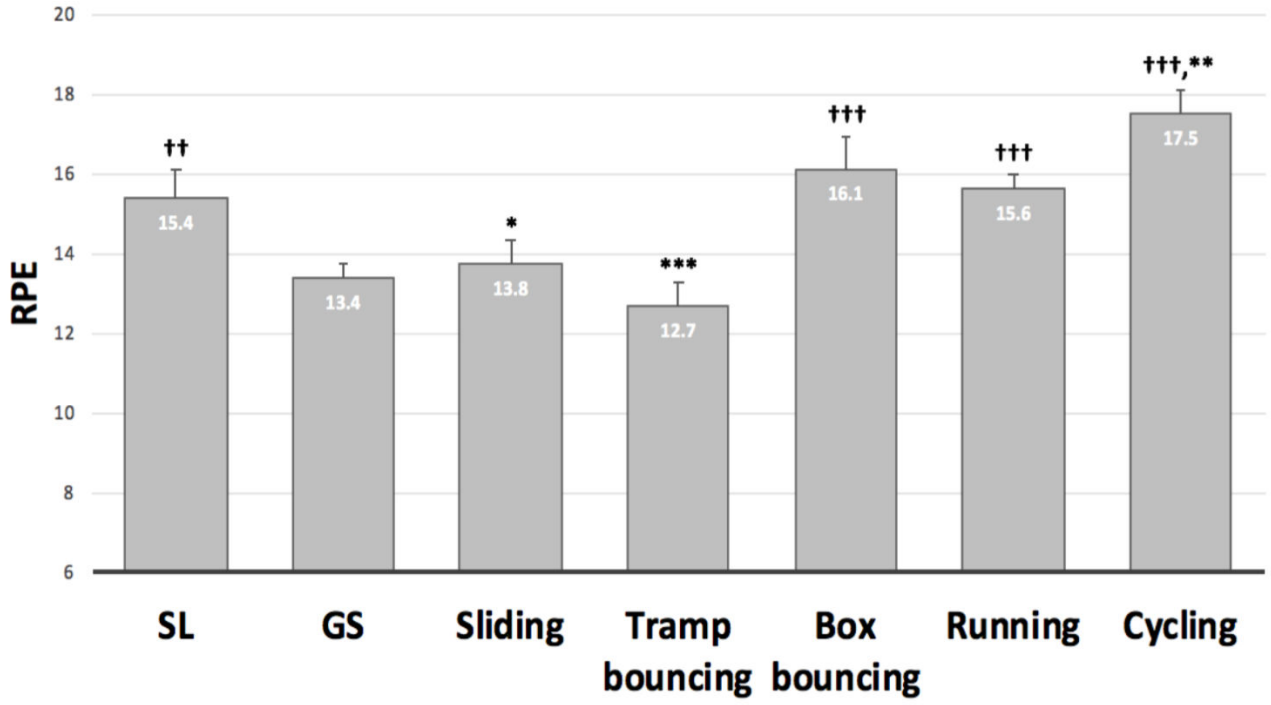
- **Fig 5.** Rate of perceived exertion scores measured after SL, GS, sliding, trampoline bouncing, box bouncing, running and cycling.


TOTAL OUTPUT CONTRIBUTION (%)
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
25.5
*
34.6
*
39.9
29.5
26.5
43.9
25.7
*
29.8
44.5
24.5
*
26.8
48.7
†
21.6
***, ††
36.7
**
41.6
20.2
***, ††
37.8
**
42.0
19.2
***, †††
43.2
***, †
37.6
*
SL
GS
Sliding
Tramp bouncing
Box bouncing
Running
Cycling
Aerobic system
Glycolytic system
Phosphagen system


ENERGY OUTPUT (kJ min-1)
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
SL
GS
Sliding
Tramp bouncing
Box bouncing
Running
Cycling
Total energy output
Aerobic energy output
Glycolytic energy output
Phosphagen energy output


*
100.00
90.00
80.00
70.00
60.00
50.00
40.00
30.00
20.00
10.00
0.00
V̇O2 average (%V̇O2max)
0-5s
5-10s
10-15s
15-20s
20-25s
25-30s
30-35s
35-40s
40-45s
45-50s
50-53s
SL
GS
Sliding
Tramp bouncing
Box bouncing
Running
Cycling


[La]peak (mmol.L-1)
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
†
11.1
8.0
10.3
10.0
†††,**
14.8
†††,**
15.7
†††,***
17.7
SL
GS
Sliding
Tramp bouncing
Box bouncing
Running
Cycling


RPE
20
18
16
14
12
10
8
6
15.4
13.4
13.8
12.7
16.1
15.6
17.5
††
*
***
†††
†††
†††,**
SL
GS
Sliding
Tramp bouncing
Box bouncing
Running
Cycling

Table

Table 1: Means (± SD) of variables during SL, GS, sliding, trampoline bouncing, box bouncing, running and cycling.

Parameters	SL	GS	Sliding	Tramp bouncing	Box bouncing	Running	Cycling
$\dot{V}O_{2peak}$	83.7	77.6	$89.1^{**,\dagger\dagger,b}$	$95.6^{***,\dagger\dagger\dagger}$	$95.6^{***,\dagger\dagger\dagger}$	$92.7^{***,\dagger\dagger\dagger}$	$90.5^{***,\dagger\dagger\dagger}$
(%$\dot{V}O_{2max}$)	(5.8)	(10.6)	(6.8)	(2.9)	(2.9)	(6.8)	(6.6)
HR_{mean}	86.3	87.0	82.4	85.1	85.1	$89.3^{b,s}$	85.7
(% HR_{max})	(3.3)	(4.9)	(6.3)	(2.6)	(2.6)	(2.8)	(3.9)
HR_{peak}	94.3	94.1	92.9	94.4	94.4	95.6	94.2
(% HR_{max})	(3.1)	(3.5)	(4.4)	(1.5)	(1.5)	(2.6)	(2.1)
$[La]_{pre}$	1.9	2.0	2.4	3.3^{*}	3.3^{*}	$3.1^{*,\dagger}$	2.6
(mmol.L^{-1})	(0.4)	(0.9)	(0.7)	(1.6)	(1.6)	(0.8)	(1.2)
Δ[La]	9.2	6.0^{*}	$7.9^{c,r,b}$	$11.4^{\dagger\dagger\dagger,c}$	$11.4^{\dagger\dagger\dagger,c}$	$12.6^{*,\dagger\dagger\dagger}$	$15.0^{***,\dagger\dagger\dagger}$
(mmol.L^{-1})	(2.4)	(1.9)	(2.7)	(2.0)	(2.0)	(3.0)	(2.4)

SL: slalom ; GS: giant slalom ; Tramp bouncing : trampoline bouncing ; $\dot{V}O_{2peak}$: peak oxygen uptake ; HR_{mean}: mean heart rate ; HR_{peak}: heart rate peak ; $[La]_{pre}$: blood lactate concentration at rest before the test ; Δ[La]: difference between maximal blood lactate concentration measured during recovery and blood lactate concentration measured before the field test.

* : Significantly different from SL: $^{*}p < 0.05$; $^{**}p < 0.01$; $^{***}p < 0.001$.

† : Significantly different from GS: $^{\dagger\dagger}p < 0.01$; $^{\dagger\dagger\dagger}p < 0.001$.

Significantly different ($p < 0.05$) from Sliding (^{s}), Box bouncing (^{b}), Running (^{r}) or Cycling (^{c}).

Etude 3

Journal of Strength and Conditioning Research

Reliability of alpine ski racing specific field test: the 80s-slide-test

--Manuscript Draft--

Manuscript Number:	
Full Title:	Reliability of alpine ski racing specific field test: the 80s-slide-test
Short Title:	
Article Type:	Original Research
Keywords:	Specific test; Test reliability; Alpine ski racing; Slide board; Slide test.
Corresponding Author:	Valentin Bottollier, M.D. (PhD Student) Universite de Rennes 2 Unite de formation et de recherche Activites physiques et sportives BRUZ, FRANCE
Corresponding Author Secondary Information:	
Corresponding Author's Institution:	Universite de Rennes 2 Unite de formation et de recherche Activites physiques et sportives
Corresponding Author's Secondary Institution:	
First Author:	Valentin Bottollier, M.D. (PhD Student)
First Author Secondary Information:	
Order of Authors:	Valentin Bottollier, M.D. (PhD Student)
	Matt R Cross
	Nicolas Coulmy
	Loïc Le Quellec
	Jacques Prioux
Order of Authors Secondary Information:	
Manuscript Region of Origin:	FRANCE
Abstract:	Purpose : The purpose of this study was to determine the test–retest reliability of the 80s-slide-test in well-trained alpine ski racers. Methods : The sample consisted of eight well-trained alpine ski racers (age: 17.8 ± 0.7 years old; height: 1.80 ± 0.09 m; body mass: 72.1 ± 9.5 kg) who performed an incremental test on cycle ergometer and three slide tests in four separate sessions. The slide test consisting of maximal push-offs performed for 80s on a 8 ft slide board. Oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) and heart rate were recorded continuously. Blood lactate was determined immediately pre-run, followed by 3 minutes post-run. Total and every 10s mean push-offs number were assessed by camera. Results : The 80s-slide-test showed strong reliability for total push-offs number, VO_2peak, VO_2mean, HRpeak and HRmean. Δ[La], fatigue index and RPE were moderately reliable. Conclusion : The 80s-slide-test is a reliable test for well-trained alpine ski racers and can be used easily by trainers.
Suggested Reviewers:	Tatiane Piucco tatianepiucco@yahoo.com.br
	Guillaume Millet guillaume.millet@univ-st-etienne.fr
Opposed Reviewers:	

Powered by Editorial Manager® and ProduXion Manager® from Aries Systems Corporation

Introduction

To improve performance and to reduce injury risks, coaches and trainers need to use physical test. To be relevant, a physical test must be physiologically specific and reliable (Hopkins et al. 2009). To the best of our knowledge, no study has demonstrated for alpine ski (AS) racing (ASR) the physiological specificity and reliability of such a test. While some studies have developed and tested the interest in ASR specific tests (Haymes et al. 1980 ; Brown and Wilkinson 1983 ; Bosco et al. 1983, White and Johnson 1991 ; Neumayr et al., 2003 ; Turnbull et al. 2009 ; Zitoun-Florentin 2011; Patterson et al. 2014), most have lacked proven specificity to the sporting task. The main reason for a lack of validation studies is the necessity comparing the physiological variables between field competition simulation ASR and prospective specific motor skills (SMS).

Recently, Bottollier et al. (2019) compared a variety of 'specific' ASR tests to physiological profiles during skiing, and found that while other common tests were clearly different (e.g. running or cycling), sliding appeared similar in its physiological load. Sliding consists of push-off on side mark, sliding on slide board before push-off on other side side mark (Figure 1).
In contrast to some of the other commonly implemented testing and training modalities, sliding appears to hold a level of biomechanical specificity to ASR (Baum et al. 1997). Likewise, these authors show that change of direction time and knee angle during sliding are similar with SL and GS (Berg and Eiken 1999 ; Szmedra et al. 2001). Moreover, sport-specificity should include not only physiological and biomechanical characteristics but perceptive-decisional factors (Sheppard et al. (2006)). In ASR, athletes must deal with the perception of lateral and frontal imbalances. While many other modalities are restricted in this manner, sliding is relatively unique. Furthermore, sliding is cost effective, portable and practical which increases its potential value to a wide range of practitioners. Logically, sliding offers an interesting and potentially valuable means of training and testing athletes in a manner specific to ASR.
The slide test has been shown to provide reliable measures of maximal aerobic output in speed skaters (Piucco et al. 2015, 2016, 2017) and AS racers (Baum et al. 1997). However, no study has assessed the reliability of rectangular slide. Contrary to triangular (different level of push-off frequency) test which assess intrinsic athlete skills without knowing how much it is useful to perform a specific rectangular test allow to assess physiological skills which are specifically involve in competitive situation. In the test, it is possible to change the length to be specific to various sporting tasks. Namely, 80s is a relevant test duration for AS racers because it is

characteristic of the longest GS durations. Indeed, GS is considered as midpoint discipline between SL and downhill (DH) (Saibene et al., 1985) which is consequently the mostly commonly researched in physiological studies (Turnbull et al. 2009). Despite this, very little research currently exists on the relevance of various training and testing tasks to ASR, and even less on the validity or reliability of said tasks. A validated ASR specific test will enable both to improve performance and to reduce injury risks. Indeed, an ASR specific test will permit (i) to objectify physiological specific effect of scheduled training regarding competitive demands, (ii) to longitudinally assess athlete shapes to try to avoid non-functional overreaching, (iii) to set post injury requirements to go back on specific exercises, and (iv) to set physiological requirements during talent detection process.

Consequently, the purpose of this study was to determine the test–retest reliability of 80s-slide-test assessing physiological parameters (oxygen consumption ($\dot{V}O_2$), blood lactate concentration ([La]) and heart rate (HR)), biomechanical parameters (total push-offs number, fatigue index) and perceptive parameter (rate of perceived exertion (RPE)) in well-trained AS racers.

Materials and methods

Subjects

8 well-trained male AS racers (17.8 ± 0.7 years, height 1.80 ± 0.09 m, and body mass 72.1 ± 9.5 kg) volunteered for the study. They trained on-snow at least 5 days a week during the winter season and 10.6 ± 3.1 hours per week during off competitive season. All subjects were active competitive athletes and competed in international races with an average performance of 81.7 ± 9.1 International Ski Federation (FIS) points in SL or GS. Before the tests, the athletes and the parents of four underage (16-17-year old) athletes were informed of the procedures, including the possible risks involved, and signed an informed consent form, and additional parental consent was obtained for those under 18 years.

Experimental approach to the problem

Subjects performed a lab-based maximal graded test on cycle ergometer to determine maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2max}$). Three to five days after the maximal graded test, subjects performed three 80s-slide-tests, each separated by 48-72h rest, over an 11-day period during December. Subjects were instructed to perform an identical standardized cycling warm-up for each test session. The three sessions were conducted within a two-hour window at the same time of day to minimize the effects of diurnal biological variation (Carter et al. 2002). Subjects were

instructed to abstain from strenuous activities and alcohol for at least 48 hours before testing. All participants were familiarized with both maximal graded test and sliding motor skills, and the material of the experiment. The study conformed to the recommendations of the Declaration of Helsinki, and was approved by the local ethics committee.

80s-slide-test:

Pre-test, racers cycled at 100W (Wattbike, Colombes, France) for 10 min, finishing with 5 x 3s maximal sprints, interspersed with 30 sec of active recovery. Subject performed four maximal intensity push-offs on slide board at every 30s. 3min rest was provided before the testing procedure began. 80s-slide-test procedure consisted of performing maximal push-offs during 80s on slide board. Racers were able to see live timing of the test, and experimenters provided an audible signal at the start, to mark 20 s remaining, and at the end of the test. Racers were cued to perform the most push-offs number during the test duration, while keeping the trunk as vertical as possible. After the test, a passive standing recovery was implemented. Performance was measured as the total push-offs number and fatigue index. 80s-slide-test was performed on 8 ft Slide Board (243.84 × 59.69 × 1.27 cm) (Ultraslide, Northbrook, US) wearing a specific pair of nylon socks (Ultraslide, Northbrook, US) over their personal running shoes while skating (Figure 1). The slide board surface was made of polyethylene, and was coated with silicon spray before each trial to minimize friction. The slideboard was secured to the ground using non-slip mats and a selection of weight plates to minimize any unwanted movement of the platform.

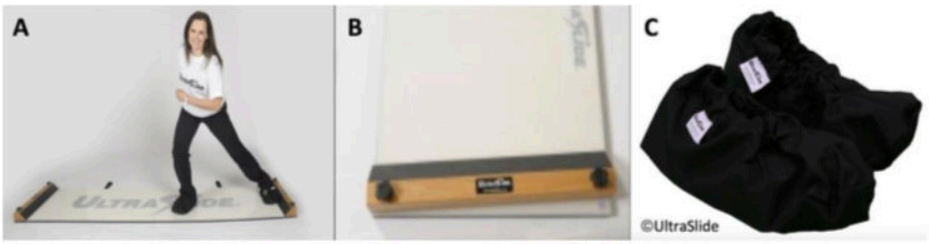


Figure 1: Pictures of Slide Board (A), side marks (B) and specific nylon socks (C)

Maximal graded test

$\dot{V}O_{2max}$ was determined using a continuous maximal graded test conducted on lab-based cycle ergometer (Erg 550, Bosch, Germany). Subjects were continuously monitored, and provided with strong verbal encouragement to persist and to keep pace 80 rotations per minute (rpm)

throughout the experiment. The resistance was set at a power of 80 Watts, which was then increased by 25 Watts every two minute until volitional exhaustion (Heil et al. 1995). Maximal aerobic power (MAP) was recorded. $\dot{V}O_2$ and HR were recorded continuously, and a blood sample was taken 3 min post-test (Bangsbo et al. 1994).

Determination of $\dot{V}O_{2max}$

The $\dot{V}O_{2max}$ corresponded to the highest $\dot{V}O_2$ attained in two successive 15s periods for the incremental cycle ergometer test. Individual $\dot{V}O_{2max}$ was considered attained when three or more of the following criteria were observed : 1) a steady state of $\dot{V}O_2$ despite increasing power (change in $\dot{V}O_2$ at $\dot{V}O_{2max} \leq 150$ mL.min^{-1}) (Taylor et al. 1955); 2) a final respiratory exchange ratio (QR) higher than 1.1 (Moseley et al. 2001); 3) visible subject exhaustion, and 4) a HR at the end of exercise within the 10 beats per minute (bpm) of the predicted maximum [210 - (0.65 x age) - (Spiro, 1977)].

Respiratory gas exchange and heart rate measurements

$\dot{V}O_2$ and carbone dioxide output ($\dot{V}CO_2$) were recorded continuously (breath-by-breath) using a validated (Lourenco et al. 2011) portable gas exchange system (Metamax, Cortex, Germany). Before each test the oxygen (O_2) and carbon dioxide (CO_2) analysis systems were calibrated using ambient air and a gas of known O_2 and CO_2 concentrations (16% and 5%, respectively). The calibration of the metamax turbine flow-meter was performed using a 3000 mL syringe (Cortex, Germany). Heart rate mean (HR_{mean}) and peak (HR_{peak}) were measured and recorded with a HR monitor (V800 and H7, Polar, Kempele, Finland) for each subject. Breath-by-breath gas exchange values were averaged with a 5s central moving average to obtain $\dot{V}O_{2max}$, peak $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_{2peak}$) and mean $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_{2mean}$). As suggested by Lamarra et al. (1987), breath-by-breath values, that were 3 standard deviation (SD) from the local mean, were removed from the analysis. $\dot{V}O_{2peak}$ and $\dot{V}O_{2mean}$ were expressed in percentage of $\dot{V}O_{2max}$.

Lactate determination and rate of perceived exertion

Blood drawn from the finder-tip (3µl) was sampled at rest ($[La]_{rest}$) before the test and 3 min ($[La]_{peak}$) after the test using a validated (Bonaventura et al. 2015) portable analyser (Lactate Pro 2, Arkray, Kyoto, Japan). Delta (Δ) [La] (Δ[La]) was calculated as difference between $[La]_{peak}$ and $[La]_{rest}$. Three min after the completion of the session, the subjects were asked to indicate their rate of perceived exertion (RPE) using Borg's scale ranging 6 – 20 (Borg 1970).

Biomechanical measurements

Tests were recorded by calibrated camera (Sony, DCR-SX34) sampling at 50 frames.s^{-1} positioned perpendicularly at four meters from the right sagittal plane of the slide board middle for two-dimensional (2D) kinematics analysis. Total push-offs number and mean push-offs number every 10s were assessed. The fatigue index was obtained by percentage decrement score adapted from Bishop et al. (2001) and Spencer et al. (2006) :

Fatigue index = (1-((total push-offs number) / (best push-offs number in 10s*8))*100)

This fatigue index has the advantage of taking into consideration all sprints, being not only influenced by a particularly good or bad first or last 10s.

Statistical analysis

Data are reported as mean ± standard deviation (SD). According to Hopkins et al (1999), the only three important types of measure to assess test reliability are: change in the mean, within-subject variation and retest correlation. Change in the mean was assessed using magnitude-based inferences. Within-subject variation was assessed using typical error of measurement (TEM) (Hopkins 2000). Retest correlation was assess computing the intra-class correlation coefficients (ICC) using a 2-factor mixed-effects model and type consistency (McGraw and Wong 1996). Average variability taken from across both measures (ICC and TEM) was interpreted as small (S) for an ICC > 0.67 and TEM < 5%, moderate (M) when ICC > 0.67 or TEM < 5%, and large (L) when ICC < 0.67 and TEM > 5%. Smallest worthwhile change (SWC) was calculated as 0.2 multiplied by the between-subject standard deviation across the two tests, as a percentage of the mean across two tests (Cohen 1988). The SWC provides a statistical estimate of the percentage change in performance required for a significant improvement. Statistical analysis was conducted using Excel 2016 (Microsoft, USA).

Results

*** TABLE 1 HERE ***

$\dot{V}O_{2max}$, HR_{max} and MAP were 62.9 ± 4.9 $mL.min^{-1}.kg^{-1}$, 199 ± 6 bpm and 319.3 ± 55.0 W, respectively.

Table 1 shows values measured during three trials of 80s-slide-test and average variability of them between trials 1 and 2 and trials 2 and 3. A large degree of reliability was found between trial 1 and 2 for total push-offs number, RPE and HR_{mean}. Between trial 1 and 2, Δ[La], $\dot{V}O_{2peak}$, HR_{peak}, fatigue index and $\dot{V}O_{2mean}$ were moderately and poorly reliable, respectively. High reliability was found between trial 2 and 3 for total push-offs number, $\dot{V}O_{2peak}$, $\dot{V}O_{2mean}$, HR_{peak}, HR_{mean} Fatigue index, Δ[La] and RPE were moderately reliable between trials 2 and 3.

Figure 1 shows push-offs number every 10s during three trials of 80s-slide-test.

*** FIGURE 1 HERE ***

Discussion

Our study showed that the 80s-slide-test is a largely reliability means of assessing specific endurance capacity. Specifically, between trials 2 and 3 total push-offs number, $\dot{V}O_{2peak}$, $\dot{V}O_{2mean}$, HR_{peak}, HR_{mean} all met the criteria for reliability (Table 1).

Total push-offs number and HR_{mean} show high reliability between trials 1 and 2 and trials 2 and 3. While not explicitly tested in this study, there appeared to be a clear learning effect in the tests. For example, the mean value of push-offs increased, and the variability in the results changed. While the former is logical, the latter might show that an additional day is necessary to better discriminate between athlete capabilities. This learning effect (figure 1) is similarly apparent in the improved reliability scores for many of the variables between testing sessions 2 and 3 ($\dot{V}O_{2peak}$, $\dot{V}O_{2mean}$, HR_{peak}). For example, among 8 variables measured 7 TEM and 7 ICC values are found to be improved or at least equal between trials 2 and 3 than between trials 1 and 2. Indeed, racers were familiarized with sliding motor skills but not with the entire 80s-slide-test. As such, while some variables appear reliable from the first session, it is likely advisable to perform an additional testing session before using the score as a reliable and true performance indicator.

SWC - representing the smallest worthwhile change in score needed for a significant performance improvement in subsequent tests – of 0.21% for total push-offs is particularly low.

SWC show interesting sensitivity for the 80s-slide-test to detect individual change that would be interpreted as real following an intervention as training. Fatigue index, Δ[La] and RPE must be used with care regarding moderate reliability found between trials 2 and 3. Wittekind et al. (2011) show RPE's sensitivity to effort design experience. RPE during 80s-slide-test might become more reliable with the experience of the test. RPE's sensitivity to effort design experience might be linked with Δ[La] (Tucker and Noakes 2009) and fatigue index regarding pacing strategy (Noakes et al. 2004). Furthermore the relatively low number of athletes in this study might have affected the results observed.

Besides physiological, biomechanical and perceptive-decisional motor skills specificity and reliability, a major point is the accessibility, usability and practicability of the assessment method (Baumgartner and Jackson, 1987). To be valuable to strength and conditioning practitioners, it must be easily transportable, easy and quick to establish, safe, and inexpensive (Baumgartner and Jackson, 1987). Sliding is characterized by all these criteria. For testing cases, SMS must also have accurate observable and quick feedback. Using video camera, only 2-3 minutes are needed to assess total push-offs number and every 10s push-offs number average post sliding test of about 60-80s.

From our findings it can be concluded that the 80s-slide-test is reliable considering total push-offs number as main performance variables. 80s-slide-test accuracy is improved when performing the entire test one time before. Fatigue index, Δ[La] and RPE must be used with particular care regarding moderate reliability found. This test may provide for coaches a more feasible and accurate alternative to lab-based tests to assess physiological shape of alpine ski racers. Future studies are necessary to better understand the biomechanics and perceptive-decisional parameters of sliding motor skills and its similarity with alpine ski racing.

Practical application

The 80s-slide-test is a relevant physiological test for AS racers because it is nowadays the only reliable test showing physiological demands specificity to *in situ* SL and GS. The reliability of the 80s-slide-test make it usable by coaches to provide accurate information on AS racers physiological skills which are involved in racing runs. 80s-slide-test will permit (i) to objectify

physiological specific effect of scheduled training, (ii) to longitudinally assess athlete shapes to try to avoid non-functional overreaching, (iii) to set post injury requirements to go back on specific exercises, and (iv) to set physiological requirements during talent detection process. Because of its simple instrumentation (price, transportability, time to analyze), 80s-slide_test is more usable and economical than less specific lab-tests. 0.21% of total push-offs number allow to observe a performance difference between two tests. Sliding motor skills can also be used to create strength and conditioning sessions involving large range of needed skills for AS racers.

Acknowledgments

The authors are grateful to athletes for their kind cooperation in the study and coaches for their technical assistance.

Conflict of interest

The authors have no conflicts of interest to declare.

Ethical standards

The experiments comply with the current laws of the country in which they were performed.

References

1. Atkinson G, Nevill AM. (1998) Statistical methods for addressing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. Sports Med; 26: 217-38.
2. Bangsbo J, Graham T, Johansen L, Saltin B (1994) Muscle lactate metabolism in recovery from intense exhaustive exercise: impact of light exercise, J Appl Physiol 77:1890–1995.
3. Baum K, Hoy S, Leyk D, Essfeld D (1997) An incremental exercise test simulating the muscular activity of slalom, in Müller et al. 1997, Sciences of skiing 1, 479- 486.
4. Baumgartner TA, Jackson AS (1987) Measurement for Evaluation in Physical Education and Exercise Science (3rd ed.), Wm. C.Brown Publishers, Dubuque, IA.
5. Berg HE, Eiken O (1999) Muscle control in elite alpine skiing. Med Sci Sports Exerc 31:1065-1067.

6. Bishop D, Spencer M, Duffield R, et al. (2001) The validity of a repeated sprint ability test. J Sci Med Sport; 4: 19-29.
7. Bonaventura JM, Sharpe K, Knight E, Fuller KL, Tanner RK, Gore CJ, (2015) Reliability and Accuracy of Six Hand-Held Blood Lactate Analysers, Journal of Sports Science and Medicine 14, 203-214.
8. Borg G (1970) Perceived exertion as an indicator of somatic stress. Scand J Rehabil Med 2:92-98.
9. Bosco, C, Luhtanen, P, and Komi, PV. (1983) A simple method for measurement of mechanical power in jumping. Eur J App Physiol Occup Physiol 50: 273–282.
10. Bottollier V, Coulmy N, Le Quellec L, Prioux J Motor skills specific to in situ alpine ski racing physiological demands (under submission in J of Strength and cond research).
11. Bottollier V, Coulmy N, Le Quellec L, Prioux J Energy demands in well-trained alpine ski racers during different duration of slalom and giant slalom (under submission in J of Strength and cond research).
12. Brown SL, Wilkinson JG (1983) Characteristics of national, divisional, and club male alpine ski racers. Med Sci Sports Exerc 15(6):491-5.
13. Carter H, Pringle JS, Jones AM, Doust JH (2002) Oxygen uptake kinetics during treadmill running across exercise intensity domains. Eur J Appl Physiol 4:347-354.
14. Cohen J (1988) Statistical power analysis for the behavioural sciences (2nd ed.). New Jersey: Lawrence Erlbaum.
15. Haymes EM, Dickinson AL (1980) Characteristics of elite male and female ski racers. Med Sci Sports Exerc 12(3):153-8.
16. Heil D, Wilcox A, Quinn C (1995) Cardiorespiratory responses to seat tube variation during steady state cycling. Med Sci Sports Exerc 27:730-5.
17. Henriksson T, Vescovi JD, Fjellman- Wiklund A, Gilenstam K (2016) Laboratory- and field-based testing as predictors of skating performance in competitive-level female ice hockey , Journal of Sports Medicine: 7.
18. Hopkins WG, Hawley JA, Burke LM. (1999) Design and analysis of research on sport performance enhancement. Med Sci Sports Exerc; 31: 472-85.
19. Hopkins WG. (2000) Measures of reliability in sports medicine and science. Sports Med; 30:1-15.
20. Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, Hanin J (2009) Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. Med Sci Sports Exerc; 41(1):3–12.

21. Lamarra NB, Whipp BJ, Ward SA, Wasserman K (1987) Effect of interbreath fluctuations on characterizing exercise gas exchange kinetics. J Appl Physiol 62:2003-2012.
22. Lourenco TF, Martins LEB, Tessutti LS, Brenzikofer R, Macedo DV (2011) Reproducibility of an incremental treadmill VO_{2max} test with gas exchange analysis for runners. J Strength Cond Res 25:1994-1999.
23. McGraw, KO and Wong, SP. (1996) Forming inferences about some intraclass correlation coefficients. Psychol Methods 1: 30–46.
24. Moseley L, Jeukendrup AE, (2001) The reliability of cycling efficiency. Med Sci Sports Exerc 33:621-7.
25. Neumayr G, Hoertnagl H, Pfister R, Koler A, Eibl G, Raas E (2003) Physical and physiological factors associated with success in professional alpine skiing. Int J Sports Med 24(8):571-5.
26. Noakes TD, St Clair Gibson A, Lambert EV (2004) From catastrophe to complexity: a novel model of integrative central neural regulation of effort and fatigue during exercise in humans. Br J Sports Med 38: 511–514.
27. Patterson, C, Raschner, C, and Platzer, H-P (2014) The 2.5-minute loaded repeated jump test: Evaluating anaerobic capacity in alpine ski racers with loaded countermovement jumps. J Strength Cond Res 28(9): 2611–2620.
28. Piucco T, dos Santos SG, de Lucas RD, Dias JA (2015) A novel incremental slide board test for speed skaters: Reliability analysis and comparison with a cycling test. Apunts Med Esport; 50(186):57-63.
29. Piucco T, O'Connell J, Stefanyshyn D, et al. (2016) Incremental testing design on slide board for speed skaters: comparison between two different protocols. J Strength Cond Res; 30(11):3116-3121.
30. Piucco T, Diefenthaeler F, Soares R, Murias JM, Millet GY (2017) Validation of a maximal incremental skating test performed on a slide board: comparison with treadmill skating, Int J Sports Physiol and perform, 24:1-15.
31. Seifert J. Kröll J. Müller E. (2009) The relationship of heart rate and lactate to cumulative muscle fatigue during recreational alpine skiing. Journal of Strength and Conditioning Research 23(3):698-704.
32. Sheppard JM, Young WB (2006) Agility literature review: classifications, training and testing. J Sports Sci, 24(9): 919–932.

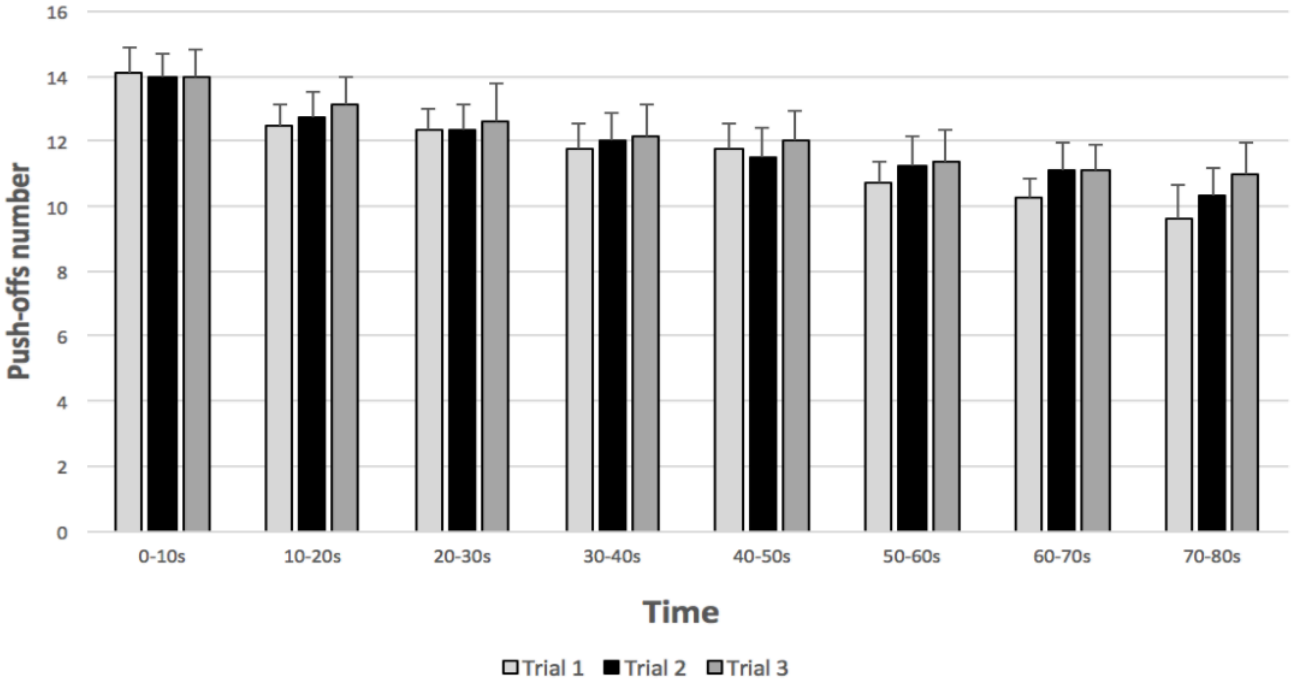
33. Spencer M, Fitzsimons M, Dawson B, et al. (2006) Reliability of a repeated-sprint test for field-hockey. J Sci Med Sport; 9: 181-4.
34. Spiro SG (1977) Exercise testing in clinical medicine, Br J Dis Chest 71(3):145-72
35. Szmedra L, Joohee IM, Nioka S, Chance B, Rundell KW (2001) Hemoglobin/ myoglobin oxygen desaturation during Alpine skiing. Medicine Science in Sports Exercise 33(2):232-6.
36. Taylor HL, Buskirk E, Henschel A (1955) Maximal oxygen intake as an objective measure of cario-respiratory performance 8(1):73-80.
37. Tucker R, Noakes TD (2009) The physiological regulation of pacing strategy during exercise: a critical review. Br J Sports Med; 43: e1.
38. Turnbull JR, Kilding AE, Keogh JWL (2009) Physiology of alpine skiing, Scand J Med Sci Sports 19:146-155.
39. Wittekind AL, D Micklewright, R Beneke (2011) Teleoanticipation in all-out short-duration cycling Br J Sports Med 2011;45:114–119.
40. White AT, Johnson SC (1991) Physiological comparison of international, national and regional alpine skiers. Int J Sports Med; 12:374-8.
41. Zitoun-Florentin F (2011) Contribution à l'analyse de la relation entre la filière aérobie et les performances sportives des skieurs alpins en filière d'accès au haut niveau de 1994 à nos jours, Dissertation, University of Grenoble (France).

Figure legend

Fig 1. Push-offs number every 10s

Table legend

Table 1 : Test - retest reliability scores of variables during 80s-slide-test


16
14
12
10
8
6
4
2
0
Push-offs number
0-10s
10-20s
20-30s
30-40s
40-50s
50-60s
60-70s
70-80s
Time
Trial 1
Trial 2
Trial 3

Table

Table 1 : Reliability measures of variables during 80s-slide-test.

	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Trial 1 – Trial 2				Trial 2 – Trial 3				
		Mean (± SD)		M_{diff} (%)	TEM (%)	ICC	Average variability	M_{diff} (%)	TEM (%)	ICC	Average variability	SWC (%)
Total push-offs	93.1 (6.3)	95.3 (11.5)	97.4 (14.3)	2.13	4.3*	0.85†	S	2.13	2.5*	0.98 †	S	0.21
Fatigue index (%)	81.9 (6.9)	83.2 (5.1)	85.7 (4.0)	1.23	6.3	-0.02	L	2.56	3.2*	0.62	M	1.05
Δ[La] ($mmol.L^{-1}$)	11.3 (1.6)	10.3 (2.4)	9.0 (2.8)	-1.04	1.9*	0.16	M	-1.24	1.9*	0.54	M	5.63
RPE	15.6 (0.5)	14.6 (0.7)	14.4 (1.3)	-1.00	0.4*	0.73†	S	-0.25	0.8*	0.46	M	1.66
$\dot{V}O_{2peak}$ ($mL.min.kg^{-1}$)	93.4 (3.9)	92.3 (4.6)	94.5 (4.3)	-1.13	4.2*	0.08	M	2.16	2.0*	0.87 †	S	0.60
$\dot{V}O_{2mean}$ ($mL.min.kg^{-1}$)	73.6 (4.4)	75.4 (5.4)	76.2 (7.9)	1.75	5.2	-0.07	L	0.79	2.9*	0.89 †	S	1.08
HR_{peak} (bpm)	97.5 (2.0)	96.3 (2.2)	95.2 (1.8)	-1.15	1.6*	0.55	M	-1.12	1.2*	0.75 †	S	0.36
HR_{mean} (bpm)	90.0 (2.6)	89.5 (3.8)	86.7 (4.0)	-0.45	2.1*	0.73†	S	-2.88	2.0*	0.86 †	S	0.64

M_{diff} : Difference in the mean ; TEM : Typical error of measurement ; ICC : Intraclass correlation coefficient ; Δ[La] : Delta blood lactate concentration ; RPE : Rate of perceived exertion ; HR: heart rate ; $\dot{V}O_2$: oxygen uptake ; SWC : Smallest worthwhile change in score needed for a significant performance improvement in subsequent tests. Average variability : small (S), moderate (M) and large (L).

† : ICC > 0.67

* : TEM < 5%

RESUME

Ce travail de thèse avait pour objectif (i) de quantifier les contraintes métaboliques en slalom (SL), en slalom géant (GS) pour des durées d'efforts courtes et longues, représentatives des temps extrêmes de compétitions contemporaines ; (ii) de comparer les demandes métaboliques entre le ski alpin *in situ* (SL et GS) et différentes motricités (bonds latéraux sur box, slide, course à pied, cyclisme, bonds latéraux sur trampoline). Quelle que soit la durée de GS en compétition, le métabolisme aérobie est prédominant dans la fourniture d'énergie. En revanche, les contributions respectives des métabolismes aérobie et glycolytique à la fourniture d'énergie ne sont pas significativement différentes en SL. Par ailleurs, la course à pied et le cyclisme sont les motricités investiguées les moins spécifiques de SL et GS. En revanche, la motricité des bonds latéraux sur box et celle des bonds latéraux sur trampoline représentent des similarités physiologiques intéressantes par rapport au SL et GS. A fortiori, la motricité du slide est la plus spécifique de SL et GS au regard de la spécificité de ses paramètres physiologiques (part d'implication des métabolismes aérobie et glycolytique, débits énergétiques total, glycolytique et aérobie, valeurs de $[La]_{pic}$ et de $\Delta[La]$). Subséquemment, l'objectif de l'étude n°3 était de déterminer la reproductibilité d'un test physique de 80s utilisant la motricité du slide. Le 80s-slide-test est un test physique spécifique du ski alpin et reproductible. En effet, le nombre total d'appuis, $\dot{V}O_{2pic}$, $\dot{V}O_{2moy}$ et FC_{moy} sont reproductibles. Ainsi, le 80s-slide-test constitue une alternative pertinente aux tests physiques non spécifiques du ski alpin menés en laboratoire. Enfin, l'objectif de l'étude de cas n°4 était de décrire la stratégie d'allure du skieur alpin au cours d'une manche longue de GS. Le skieur alpin adopterait une stratégie d'allure au cours d'une manche longue de GS en diminuant l'intensité de ski de manière anticipée dès la section 1 (premières 52s) puis durant la section 2 (dernière 29s) lors d'un GS long (81s).

ABSTRACT

The objective of this thesis was (i) to assess metabolic constraints in slalom (SL) and giant slalom (GS) during short and long effort according to extrem contemporary races duration ; (ii) to clarify motor skills (box bouncing, sliding, running, cycling, trampoline lateral bouncing) energetically specificity to alpine ski racing. Regardless of GS length the aerobic system was the primary energy system involved. Aerobic and glycolytic energy system contribution were not different in SL. Furthermore running and cycling were most unspecific motor skills investigated regarding SL and GS. On the other hand box bouncing and trampoline lateral bouncing presented interesting physiological specificities. Moreover no significant difference in aerobic and glycolytic energy system contribution, total energy output, glycolytic energy output, aerobic energy output, phosphagen energy output, $[La]_{peak}$, $\Delta[La]$ were observed between sliding and both GS and SL. Subsequently the aim of the third study was to determine the test-retest reliability of a 80s test involving sliding motror skills. The 80s-slide-test is a specific and reliable test. Indeed the 80s-slide-test showed large reliability for total push-offs number, $\dot{V}O_{2peak}$, $\dot{V}O_{2moy}$, FC_{peak} and FC_{moy}. Hence 80s-slide-test is a relevant alternative to lab unspecific test for alpine ski racers. Finally the aim of the fourth study was to analyse pacing strategy in long GS. Alpine ski racer may run pacing strategy skiing decreasing intensity during section 1 (first 52s) and during section 2 (last 29s) in long GS (81s).